引用格式：李广汉，孙东生，韩军，等，2025. 体积式采动应力监测传感器研发及其应用[J]. 地质力学学报，31（6）：1210−1221. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025078

Citation: LI G H，SUN D S，HAN J，et al.，2025. Research and development of a volumetric mining-induced stress monitoring sensor and its application[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1210−1221. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025078

体积式采动应力监测传感器研发及其应用

李广汉[1,2]，孙东生[3,4]，韩　军[1,2]，郭宝龙[1,2]，马双文[1,2]，朱志洁[1,2]

LI Guanghan[1,2]，SUN Dongsheng[3,4]，HAN Jun[1,2]，GUO Baolong[1,2]，MA Shuangwen[1,2]，ZHU Zhijie[1,2]

1. 辽宁工程技术大学矿业学院，辽宁 阜新 123000；
2. 矿山重大灾害防治与环境修复省部共建协同创新中心，辽宁 阜新 123000；
3. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
4. 自然资源部地应力工程技术创新中心，北京 100081

1. *Mining College*, *Liaoning Technical University*, *Fuxin* 123000, *Liaoning*, *China*;
2. *Collaborative Innovation Center of Mine Major Disaster Prevention and Environmental Restoration*, *Fuxin* 123000, *Liaoning*, *China*;
3. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Science*, *Beijing* 100081, *China*;
4. *Technology Innovation Center for In-situ Stress*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*

Research and development of a volumetric mining-induced stress monitoring sensor and its application

Abstract: ［**Objective**］As coal mining depth continuously advancing to the kilometer level, the dynamic evolution characteristics of mining-induced stress fields have become a crucial challenge for deep surrounding rock stability control and dynamic disaster early warning. Existing traditional monitoring equipment is limited by uniaxial measurement, and suffers from insufficient monitoring sensitivity and poor long-term stability in heterogeneous media such as coal and rock masses, failing to meet the precise monitoring needs of deep mining. ［**Methods**］This study proposes a new type of volumetric mining-induced stress monitoring sensor. Through complete coupling between its cylindrical sensing structure and the surrounding rock of the borehole, it breaks through the uniaxial measurement limitation of traditional equipment, enabling real-time monitoring of mining-induced stress changes caused by micro-deformations of surrounding rock masses. ［**Results**］Laboratory tests, field tests, and application results show the following: (1) In laboratory tests, the pressure change output by the sensor shows a highly linear relationship with axial stress, with a sensitivity of 0.456, which is better than that of traditional stress gauges; (2) Long-term stability tests indicate that under high and low stress environments, the sensor’s pressure fluctuations show no continuous drift or data jumps, demonstrating good long-term monitoring stability; (3) Temperature characteristic experiments reveal a linear relationship between temperature and pressure changes, verifying the universality of the temperature compensation formula; (4) In the field application at Yadian Coal Mine in Binchang Mining Area, Shaanxi Province, the sensor successfully captured stress fluctuations synchronized with the mining cycle. In sudden stress events, such as roof fractures, its response speed and accuracy were significantly better than those of traditional equipment, and the monitoring data showed a strong correlation with microseismic monitoring results; (5) Tests in hard rock environments in metal mines also confirmed the sensor's long-term stable monitoring capability. ［**Conclusion**］(1) The new volumetric mining-induced stress monitoring sensor overcomes the uniaxial measurement limitation of traditional equipment, significantly improving monitoring sensitivity and long-term stability in heterogeneous

基金项目：深地国家科技重大专项（2024ZD1000705）

This research is financially supported by the National Science and Technology Major Project on Deep Earth Exploration (Grant No. 2024ZD1000705).

第一作者：李广汉（2000—），男，在读博士，研究方向为岩层控制与矿井动力灾害防治。Email：13475781258@163.com

通信作者：韩军（1980—），男，博士，教授，主要从事岩层控制与矿井动力灾害防治方面的教学与研究工作。Email：hanjun@lntu.edu.cn

收稿日期：2025−06−26；**修回日期**：2025−09−09；**录用日期**：2025−09−10；**网络出版日期**：2025−09−22；**责任编辑**：王婧

media; (2) Laboratory tests verify its linear response characteristics, high sensitivity, and temperature adaptability, while field applications prove that it can effectively capture the dynamic evolution characteristics of mining-induced stress; (3) The sensor can work stably in different mining environments such as coal mines and metal mines, showing strong applicability. [**Significance**] This research solves the key problems of insufficient monitoring sensitivity and poor long-term stability of mining-induced stress in deep heterogeneous media. It provides reliable technical support for capturing precursor information of dynamic disasters in deep mines and early warning of delayed rockbursts in tunnels, with important scientific value and application innovation.

Keywords: mining-induced stress; volume strain inversion; coupling process; deep mining; dynamic disaster warning

摘　要：随着煤矿开采深度持续向千米级推进，采动应力场的动态演化特征成为深部围岩稳定性控制与动力灾害预警的核心难题。为此，文章研发了一种新型体积式采动应力监测传感器，其通过圆柱形传感结构与钻孔围岩完全耦合，突破了传统设备的单轴测量局限，可实时监测围岩体微小变形引起的采动应力变化，显著提升了煤岩体等非均质介质中的采动应力监测敏感性与长期稳定性。实验室测试结果显示，传感器输出压力变化与轴向应力呈高度线性关系，灵敏度达 0.456，优于传统应力计。在长期稳定性测试中，高、低应力环境下的压力波动均未出现持续漂移或数据跳变；温度特性实验揭示了温度与压力变化的线性关系，验证了温度补偿公式的普适性。在陕西彬长矿区雅店煤矿的现场应用中，该传感器成功捕捉到回采过程中与开采周期同步的应力波动；在顶板断裂等突发应力事件中，其响应速度与精度显著优于传统设备，且与微震监测数据具有强相关性；在金属矿山硬岩环境测试中，传感器亦展现出长期稳定的监测能力。试验及应用结果表明，该技术可高效捕捉动力灾害前兆信息，在深埋矿山采动应力监测及深埋隧道迟滞型岩爆预警等领域具有广阔应用前景。

关键词：采动应力；体应变反演；耦合工艺；深部开采；动力灾害预警

中图分类号：P31; TD326　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)06−1210−12

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025078

0　引言

采矿诱发的应力变化及相关的岩体变形会严重影响地下硐室的稳定性。采动应力本质上是开挖扰动打破了岩体原有的力学平衡，引发应力在空间上的重新分配，是地下工程稳定性控制的核心研究对象。工程实践则进一步证明了监测采动应力的重要性。从回采工作面的煤柱留设到巷道支护参数设计，特别是冲击地压、煤与瓦斯突出、突水等灾害的超前预警，均需依赖于采动应力场时空分布特征的数据采集。国家矿山安监局明确规定，应通过采动应力监测与多参量耦合分析，实现对冲击地压、煤与瓦斯突出等煤矿动力灾害的预警（国家煤矿安监局，2018；张志刚等，2024）。现阶段采动应力相关监测技术的应用已拓展至其他地下工程领域。在隧道施工与运营中，采动应力监测技术常被用于评估围岩动态响应及支护结构的安全性；大型水电工程中，地下厂房及硐室群常面临高地应力引起的岩爆风险，通过布设钻孔应力计，可预警岩体破裂并指导施工调整。

采动应力监测技术起源于 20 世纪中叶岩石力学学科的形成期。美国矿业局首次提出扁平槽应力监测技术，通过在钻孔壁切割 30.48 cm 宽的扁平槽，利用槽内液压扁千斤顶与孔壁压力单元的应力−变形耦合关系，实现了平面主应力的动态监测（Panek et al., 1964）。此时的扁平钻孔压力计（BPC）采用混凝土封装技术，将扁平钢制囊体包裹在直径 5.94 cm、长度 22.23 cm 的混凝土圆柱体内；圆柱式传感器（CPC）直接嵌入钻孔，依赖传感器自身刚性实现应力传递。现场测试表明，该系统在冲击地压易发矿区能捕捉到 70 MPa 的应力相对突增（Gilley et al., 1964），为动力灾害失稳预警提供了关键数据。Obert and Duvall（1967）进一步发展了钻孔径向位移监测技术，通过电阻应变片测量孔壁变形，其“应力−径向变形”耦合理论延续了扁平槽方法的非接触式测量思路，属于单轴应力感知。自 20 世纪 70 年代起，中国地震局以苏恺之先生为代表的科研团队研制出系列体积式钻孔应变仪。其核心原理是通过密封弹性钢筒与岩体的耦合传递应变，进而反演体积应变，在均质完整的地壳深部岩体中实现了 10^{-9} 量级的应变分辨率，目前已在中国百余处地震台网

实现规模化应用(苏恺之, 2003; 马京杰和李海亮, 2021)。Lu(1981, 1984)提出了通过同一钻孔安装1个圆柱式传感器(CPC)与2个扁平式传感器(BPC)反演二维应力状态。Keller and Lowry(1990)通过扁平千斤顶的现场校准机制,采用预制金属夹装传感器的方式解决了传感器与围岩耦合失效问题,通过机械锚定实现传感器与孔壁的刚性耦合,在高温与高应变环境中实现了0.01 MPa的应力分辨率,显著提升了复杂条件下的监测可靠性。进入21世纪,澳大利亚CSIRO研发的空心包体应变计通过三维应变花技术,在花岗岩等硬岩地层中表现出较高可靠性(Worotnicki, 1993; Brady and Brown, 2006)。

当前,采动应力监测的主流设备以空心包体应变计和钻孔应力计为主。空心包体应变计基于胡克定律反演围岩三维应力状态,严重依赖完整弹性介质假设,在硬岩环境中成功率较高(蔡美峰等, 1995; Salvini et al., 2022),但在煤体等非均质介质中易发生应力传递失真问题(Amadei, 1985; 夏方迁等, 2020)。目前国内最常见的钻孔应力计设备是液压式钻孔应力计和振弦式钻孔应力计。液压式钻孔应力计是通过向膨胀枕内充注液压油,利用油囊与孔壁的接触来反映围岩应力变化;振弦式钻孔应力计则是基于钢弦振动频率与应力的线性关系,通过激振器激发并采集频率信号(宋广东等, 2012; 刘伟建, 2019)。然而,钻孔应力计现有技术仍面临以下几点问题。①煤体、软岩等非弹性介质的长期流变导致传感器−围岩界面滑移或脱黏。例如,Newman(1989)曾观测到煤柱预破坏阶段弹性模量较实验室测量值下降一个数量级,传统设备难以实现对这种非线性变化的实时监测。液压式应力计的油囊与孔壁接触压力随煤体蠕变逐渐衰减,需定期校准;而振弦式应力计的钢弦张力因界面位移易发生松弛,尤其在冲击地压等瞬态应力突变场景下,无法及时捕捉应力信号。②多维度应力监测的精度不足。Swolfs and Brechtel(1977)研发的扁平槽式应力计虽能捕捉10^3 N/m^{2}量级的采动应力信号,但其细长结构在深部高应力下的长期稳定性仍需验证。③传统设备依赖人工校准或离线解算,无法满足智能矿山对秒级响应的需求。液压钻孔压力计的发展历程凸显了采动应力监测的核心矛盾,即刚性接触式测量与非均质岩体动态变形的不兼容。

针对现有采动应力监测技术在结构设计和现场应用等方面的局限性,文章研究团队研发出一种体积式采动应力监测传感器。由于煤岩体的破坏通常是三向应力共同作用的结果,圆柱形结构能够测量煤体的水平和竖直方向的总应力而非单一方向应力,更准确地反映煤岩体真实的受力状态。基于全向压力耦合原理,利用传感器与钻孔间的环形黏合剂,显著提升应力传递效率与复杂围岩条件的适应性,为揭示深井采动应力演化规律、构建动力灾害预警体系提供技术支持。

1 新型采动应力监测传感器结构及其原理

针对前述采动应力监测的技术瓶颈,要实现深部复杂地质条件下采动应力场的精准监测,必须突破传统设备的单轴测量局限与介质适应性缺陷。文章所研发的新型采动应力计安装以环形黏合剂为应力传递介质,其核心原理在于将煤岩体钻孔的体积应变($\Delta V/V$)与液压腔的油压变化(ΔP)建立数学关系。下文将阐述该应力计的机械结构特征与工作原理,揭示其相较于传统设备的理论突破点,为后续的力学建模与工程验证奠定基础。

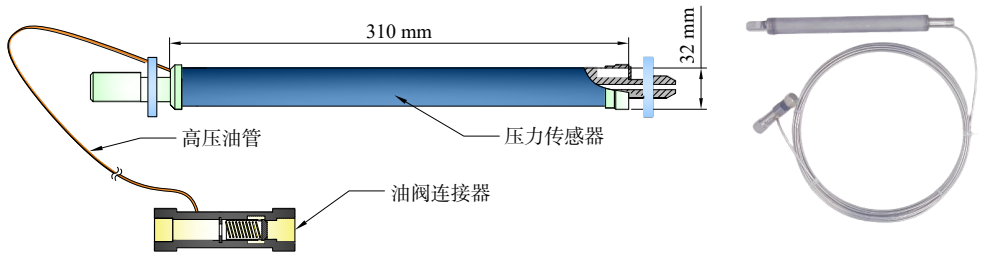
1.1 新型采动应力计结构

新型采动应力计采用全封闭液压传感结构,由压力传感器、高压油管及油阀连接器3部分构成(图1),其结构满足深部围岩−仪器耦合的应力场各向同性传递需求。

该系统中,黏合剂作为钻孔围岩−传感器界面的应力传递介质,以硅酸盐水泥浆为基础材料,添加早强剂以提升早期强度并控制凝结时间,浆液水灰比控制在0.40～0.45范围内,确保其具有良好的流动性和可泵性。通过注浆工艺,黏合剂在煤岩体表面形成平均厚度为5.0±0.2 mm的连续包裹层,实现围岩钻孔体积应变($\Delta V/V$)向传感器壳体的各向同性传递。安装后的应力计−围岩系统形成“煤岩体−黏合剂−传感器壳体”耦合体系(图2)。

1.2 理论模型耦合机制

传统液压应力计基于平面应力假设,忽略了钻孔几何形态与围岩变形的耦合效应,导致其在非均质介质中测量误差显著。为解决传统设备在非均质介质中的耦合失效问题,该新型应力计采用厚度均匀的环形黏合剂作为应力传递介质,在孔壁形成连续包裹层,将围岩内的应力变化通过钻孔变形传递给体积式传感器,避免了点接触或线接触的耦合效果差的问题,可同步响应围岩应力变化。煤矿工



(a)结构系统示意图　　(b)实物图

图 1　新型采动应力计结构系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the structural system of the novel mining-induced stress gauge

(a) Schematic diagram of the structural system; (b) Photo of the sensor prototype

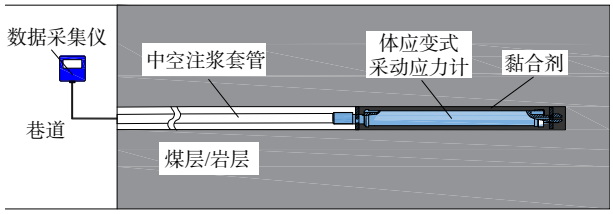


图 2　新型采动应力计−围岩耦合系统示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the novel mining-induced stress gauge and surrounding rock coupling system

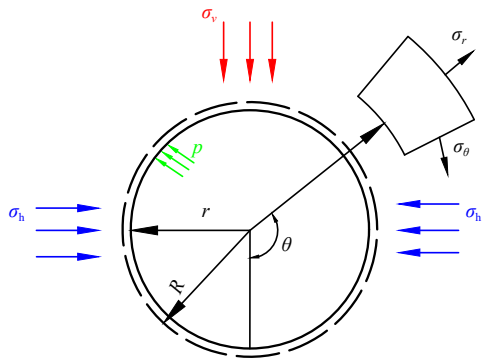
程中，采动应力监测的核心目标是预警岩体失稳（如冲击地压、顶板垮落），而这类灾害本质上是应力共同作用超过岩体强度极限的结果，而非单一方向应力的孤立影响。为此，该应力计的传感器部分采用圆柱形设计，消除了平面定向安装的几何约束，可同步响应水平与垂直的应力变化，理论上对任意方向的应力扰动均具有一致的敏感性。黏合剂的黏结强度通常高于煤层抗拉强度，即使煤体发生局部开裂，黏合剂层仍能通过桥接作用传递应力，有效抑制界面滑移，实现长期稳定监测。

该研究基于弹性力学平面应变理论（即沿钻孔轴向应变 ε_z=0），构建“围岩−黏合剂−应力计”耦合系统的压力传递模型（Panek and Stock, 1964; Panek, 1973; 图 3）。具体推导过程如下：

在平面应变条件下（ε_z=0），围岩应力分量与本构方程为：

$$\begin{cases}\sigma_r=\dfrac{E(1-v)}{(1+v)(1-2v)}\varepsilon_r+\dfrac{Ev}{(1+v)(1-2v)}\varepsilon_\theta\\ \sigma_\theta=\dfrac{Ev}{(1+v)(1-2v)}\varepsilon_r+\dfrac{E(1-v)}{(1+v)(1-2v)}\varepsilon_\theta\end{cases}\tag{1}$$

式中，E—围岩弹性模量；v—泊松比；ε_r—径向应变；ε_θ—环向应变；σ_r—径向应力；σ_θ—环向应力。在钻孔应力计表面，即黏合剂内径处（R=r），由对称性可得 ε_r =ε_θ。结合边界条件 σ_r=σ_θ=−p，并设径向位移为 u，由于 $r\gg u$，应力计体积变化 ΔV 由周向收缩



σ_v—竖直方向应力，σ_h—水平方向应力，p—应力计内部压力；R—应力计受压变化前的半径；r—应力计受压变化后的半径；σ_r—径向应力；σ_θ—环向应力；σ_h—水平方向应力

图 3　新型应力计施加均匀应力状态时的应力分布

Fig. 3　Stress distribution of the novel stress gauge under uniform stress state

σ_v—vertical stress; σ_h—horizontal stress; p—internal pressure of the stress gauge; R—radius of the stress gauge before compression; r—radius of the stress gauge after compression; σ_r—ridial stress; σ_θ—hoop stress; σ_h—horizontal stress

主导，忽略高阶小量：

$$\Delta V\approx 2\pi rL\cdot u=2\pi r^2L\cdot\frac{p(1+v)(1-2v)}{E}\tag{2}$$

式中，L—应力计传感器长度；u—径向位移。

设传感器刚度 K 表示系统刚度，外部压力 p 导致传感器体积变化 ΔV，进而引发内部压力变化 ΔP，反映其抵抗体积变化的能力：

$$K=\frac{\Delta P}{\Delta V}\tag{3}$$

联立公式（2）（3），消去 ΔV，可得外压−内压耦合方程：

$$p=\frac{\Delta P\cdot E}{2\pi a^2L(1+v)(1-2v)K}\tag{4}$$

该部分建立了采动应力计−围岩耦合系统的压力传递方程，提出一个考虑围岩弹性模量（E）、泊松

比(ν)及传感器系统刚度的数学模型。理论分析表明,在准静态均匀应力条件下,传感器输出压力与外部应力呈线性正比,其比例系数由围岩力学参数(E, ν)与传感器结构参数共同决定,为后续传感器灵敏度标定与参数优化提供了理论依据。

理论设计的有效性还需通过实际性能测试来验证。下文将从线性度与灵敏度、稳定性以及温度特性等方面对新型采动应力计进行全面性能测试,以评估其在实际工程应用中的可行性。

2 新型采动应力计性能测试

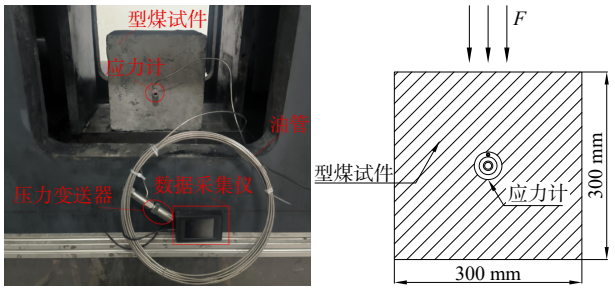
2.1 线性度与灵敏度测试

线性度与灵敏度是衡量采动应力计能否准确反映应力变化的关键指标,其特性直接决定了设备在深部开采复杂应力场中的监测精度与动态响应能力。线性度体现了应力计受到外部压力与其输出的应力数据的理想拟合直线的契合程度,高线性度意味着应力计测量更精准,能有效减少测量误差。

为测试上述性能,研究采用双轴岩石力学试验系统对新型采动应力计开展单轴压缩试验。制备标准立方体型煤试件(300 mm×300 mm×300 mm),将应力计安装于试件中心位置,以水泥浆作为黏合剂,实现应力计−煤体界面的耦合。待黏合剂固化3天后,进行应力计加载测试(图4)。

通过对试验机设置程控单轴加压,加载过程采用压力控制模式,加载速率为9 kN/min(等效应力速率0.1 MPa/min),基于试件横截面积0.09 m^2,按$\sigma=\dfrac{F}{A}$进行载荷−应力转换,其中,σ为应力,F为载荷,A为受力面积。

加载过程设定为7个应力梯度,分别为0→0.5→1.0→1.5→2.0→2.5→3.0→3.5 MPa,对应的试验机载荷增量为45 kN、90 kN、135 kN、180 kN、225 kN、270 kN、315 kN。每级加载达到目标值后稳压,直至数据采集仪记录的数值稳定。数据采集仪的采样频率设置为1 Hz,同步记录采动应力计的应力数据与试验机的加载压力。



F—载荷

图4 型煤试件与新型采动应力计加载示意图

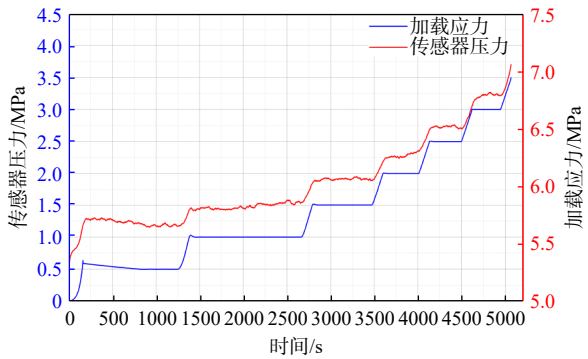
Fig. 4 Schematic diagram of the loading setup for the briquette specimen and the novel mining-induced stress gauge

F–load

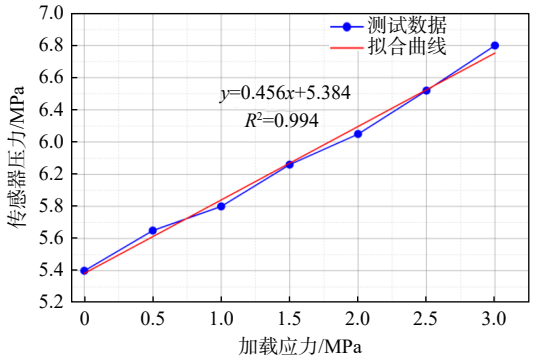
初始零载荷状态下,传感器读数为5.3 MPa。随着试验机压力从0 MPa逐级加载至3.5 MPa,应力计的观测值由5.3 MPa相应增加至7.0 MPa,其变化过程如图5a所示。

通过线性拟合结果(图5b),得到拟合方程:y=0.456x+5.384,判定系数R^2=0.994。该拟合结果中判定系数R^2接近1,表明应力计具有较高的线性度,能很好地反映实际应力变化。

灵敏度反映了应力计对外部应力变化的感知能力,数值越高代表应力计对外部应力变化的感知能力越强。根据中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局(2015)中关于灵敏度标定的要求,灵敏度S的定义为应力计输出变化量ΔP与输入变化量



(a)加载应力与传感器压力曲线



(b)加载应力与传感器压力拟合曲线

图5 新型应力计加载数据图

Fig. 5 Loading data graph of the novel stress gauge

(a) Plot of applied stress as a function of sensor pressure; (b) Regression curve of applied stress versus sensor pressure

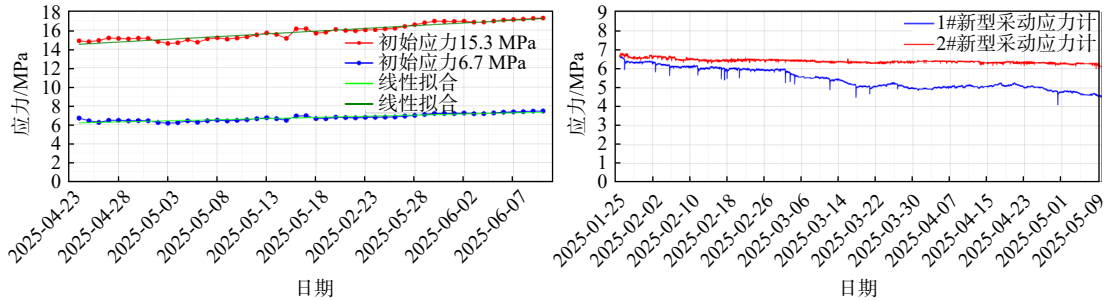
$\Delta\sigma$ 的比值，即单位外部应力变化引起的传感器输出压力变化量：

$$S = \frac{\Delta P}{\Delta \sigma} \approx 0.456 \tag{5}$$

测试结果显示，新型采动应力计灵敏度明显优于传统钻孔采动应力计（夏方迁等，2020）。

2.2　稳定性测试

应力监测往往是一个长期的过程，应力计通常需长期埋设在井下用于监测采动应力的变化。长期稳定性测试旨在评估应力计在长时间使用过程中能否保持腔体内压力和测试数据的稳定。实验室测试采用 15.3 MPa 和 6.7 MPa 2 种初始压力，分别模拟深部矿井高应力集中区（如超前支承压力峰值区）与低应力卸压区 2 种典型现场工况，测试结果如图 6 所示。



（a）实验室测试曲线　　（b）现场测试曲线

图 6　新型应力计长期稳定性测试曲线

Fig. 6　Stability test curve of the novel stress gauge

(a) Laboratory test curve; (b) Field test curve

由图 6a 可知，新型采动应力计通过打压获得初始压力为 15.3 MPa，在后续一天内压力下降至 15 MPa，初始稳定时间约为 1 d。在后续为期 30 d 的监测周期中，受实验室环境温度季节性升高影响，压力出现一定幅度上升，但应力计测量数据未出现大幅跳变的情况，表明该应力计在高应力状态下展现出较为优秀的长期稳定性。

为区分应力与温度的影响，文章针对 15.3 MPa 高应力与 6.7 MPa 低应力 2 种典型工况下的数据进行了温度干扰隔离处理。结果显示，应力计测量数据在 30 d 的监测周期内未出现大幅跳变或持续偏离，高低应力状态下的波动均处于合理范围。

现场测试中，1#与 2#应力计安装后，后续 3 个月其在复杂工况下仍能保持稳定工作状态（图 6b）。新型采动应力计在实验室与现场环境中均展现出良好的长期稳定性。

2.3　温度特性测试

温度特性测试主要是探究温度变化对新型采动应力计测量结果的影响规律，针对不同的温度环境，需采取相应的措施（如数据修正），以消除温度对测量结果的干扰，确保应力计测量数据的准确性，进而保障对采动应力状态判断的正确性。

外界温度升高会同时引起传感器壳体和内部液压油发生热膨胀。由于壳体膨胀受几何约束，而液压油膨胀受封闭壳体限制，两者的体积变化差会直接导致内部压力变化。为定量表征传感器壳体与内部液压油热膨胀特性差异对封闭系统内部压力的影响，根据热膨胀本构关系，结合体积相容性条件与体积模量定义，推导温度变化 ΔT 与压力变化 ΔP 的定量关系。

传感器壳体受热膨胀后的容积变化为：

$$\Delta V_{\text{shell}} = 3\beta V_0 \Delta T \tag{6}$$

式中：V_0 为壳体初始体积；β 为壳体材料线膨胀系数；ΔT 为温度变化量。

当传感器内液压油受热膨胀，若壳体未约束，则其体积变化为：

$$\Delta V_{\text{oil}} = \alpha V_0 \Delta T \tag{7}$$

式中：α 为液压油体积膨胀系数。

由于壳体封闭，液压油膨胀受壳体限制，液压油的净体积变化为两者之差：

$$\Delta V = \Delta V_{\text{oil}} - \Delta V_{\text{shell}} = (\alpha - 3\beta) V_0 \Delta T \tag{8}$$

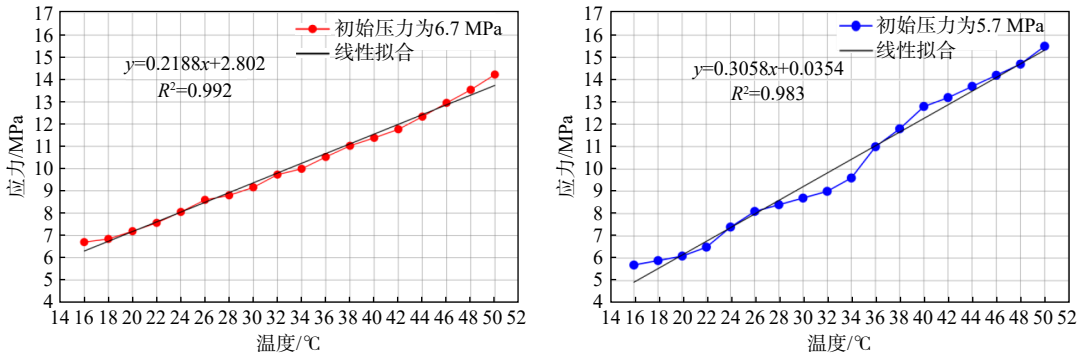
根据体积模量的定义 $K_v = V\dfrac{\Delta P}{\Delta V}$，代入公式（8），得到温度变化 ΔT 引起的压力变化 ΔP 的表达式为：

$$\Delta P = K_v \frac{(\alpha - 3\beta) V_0 \Delta T}{V_0} = K_v(\alpha - 3\beta)\Delta T \tag{9}$$

选取以下假设参数进行验算：一般情况下，液压油的体积模量介于 1400 MPa 至 2000 MPa，实际中可能因含气泡而降低；当液压油中混入 1% 的空气时，其体积模量会显著降低，约为纯油体积模量的 1/4 至 1/10（Broyles and Cassan, 1968; Kutz, 2015）。因此，该研究假设液压油体积模量 K_v=350 MPa；同时，设定液压油体积膨胀系数 α=7×10^{-4} /℃，壳体材料线膨胀系数 β=1×10^{-5} /℃，带入公式（9）计算得到：

$$K_v(\alpha-3\beta)=0.2345\ \text{MPa}/℃$$

公式（9）表明，温度引起的压力变化（ΔP）与温差（ΔT）呈线性关系，且线性系数仅由材料特性决定，与初始压力无关。为验证该关系，开展了温度特性实验。实验在保温箱内进行：温度从 16 ℃ 逐步升温至 50 ℃，每升高 2 ℃ 后保温 2 小时，待监测数据稳定后采集数据，测试结果如图 7 所示。初始压力 6.7 MPa 时的温度特性曲线（图 7a）显示，监测压力随温度升高呈良好线性增长，拟合方程为：y = 0.2188x+2.802，判定系数R^2= 0.992；同样，初始压力 5.7 MPa 时的温度特性曲线（图 7b）显示，传感器压力与温度亦呈现线性关系，拟合方程为 y=0.3058x+0.0354，判定系数 R^2=0.983。2 组实验均验证了“温度−压力线性响应”规律，代表其是传感器的固有特性。拟合方程中截距 C 的物理意义与横坐标（温度 T）直接相关，代表温度为 16 ℃ 时的理论压力值，本质上反映传感器的初始平衡状态。



（a）初始压力为6.7 MPa （b）初始压力为5.7 MPa

图 7 新型应力计温度特性测试曲线

Fig. 7 Temperature characteristic test curve of the novel stress gauge

(a) At an initial pressure of 6.7 MPa; (b) At an initial pressure of 5.7 MPa

温度特性实验结果显示，两种初始压力下对应的温度系数（线性斜率）分别为 0.219 MPa/℃ 和 0.3058 MPa/℃，验证了温度补偿公式 $\Delta P=K_v(\alpha-3\beta)\Delta T$ 的普适性。尽管液压油的压缩状态及含气量的细微影响导致温度系数存在差异，但两者的压力变化与温度变化均呈线性相关，证明该公式适用于不同应力水平场景。相较于非线性温度漂移的传感器需要构建复杂补偿函数，该设备的线性温度特性简化了补偿修正流程。在深部矿井等存在周期性温度波动的场景中，该传感器仍能通过预设的温度灵敏度参数快速完成在线校正，确保应力监测数据的温度稳定性。

3 现场工程实践

3.1 现场测试方案

在实验室测试验证了应力计的基本性能的基础上，为评估其在真实矿山环境中的实际应用效果，于陕西彬长矿区雅店煤矿 1401 工作面开展了现场实测。该工作面采用综合机械化放顶煤开采工艺。

1401 工作面位于 4 号煤层一采区西翼。工作面北侧为 1403 工作面采空区，南侧为待采实体煤，西侧为矿井边界，东侧布置有 4 号煤胶带运输下山、4 号煤辅助运输下山和 4 号煤回风下山 3 条巷道，具体位置如图 8 所示。雅店煤矿 4 号煤层的特征如表 1 所示。

在 1401 工作面回风巷道实体煤侧（距巷口 110 m 处），分别安装了 2 组采动应力计进行对比试验：一组为新型采动应力计，另一组为目前矿山常用的采动应力计。2 组应力计安装位置相邻（间距 2 m），均采用垂直于煤壁的钻孔，孔深 12 m，孔径分别匹配应力计外径，确保采动应力计所监测区域地质条件和采动影响一致。

新型应力计采用圆柱形传感结构与环形注浆

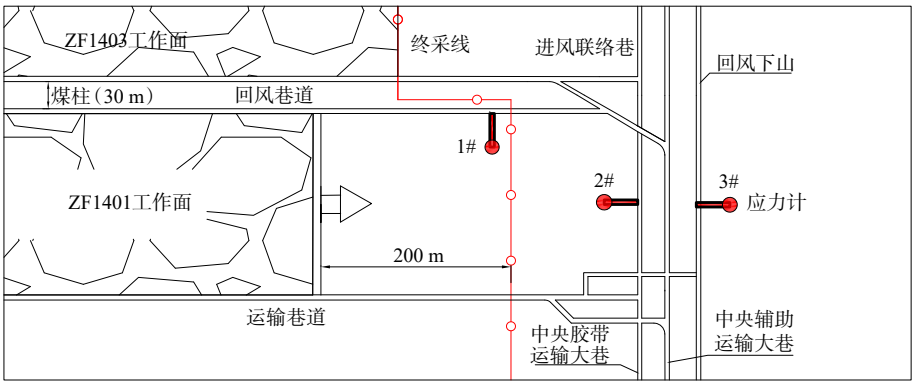


图 8　1401 综放工作面位置示意图

Fig. 8　Location diagram of 1401 fully mechanized caving face

表 1　雅店煤矿 4 号煤层特征综合表

Table 1　Comprehensive table of characteristics of No. 4 coal seam in Yadian Coal Mine

特征类别	参数指标	详细说明
厚度特征	平均厚度	11.85～12.07 m(特厚煤层)
	夹矸特征	局部含泥岩夹矸1～2层, 单层厚0.2～0.66 m
力学性质	单轴抗压强度	11.80～16.36 MPa(中硬煤层)
	弹性模量	2.54 GPa
	泊松比	0.3
裂隙发育特征	地应力特征	水平应力主导(最大主应力15.89 MPa)
	构造背景	单斜构造(倾角<5°), 无大型断层
	导水裂隙带高度	205～214 m(裂采比≤20)

耦合工艺，安装时通过扶正器居中定位，注入黏合剂形成均匀的密封层，确保与煤体耦合，有效地传递应力变化；对比组应力计为传统充液膨胀枕式采动应力计，依赖平面定向安装，通过水平仪校准垂直应力方向，通过膨胀油囊与孔壁接触。2 组设备同步接入远程监测系统，以 1 次/s 的频率采集应力数据，覆盖 1401 工作面的回采期间。

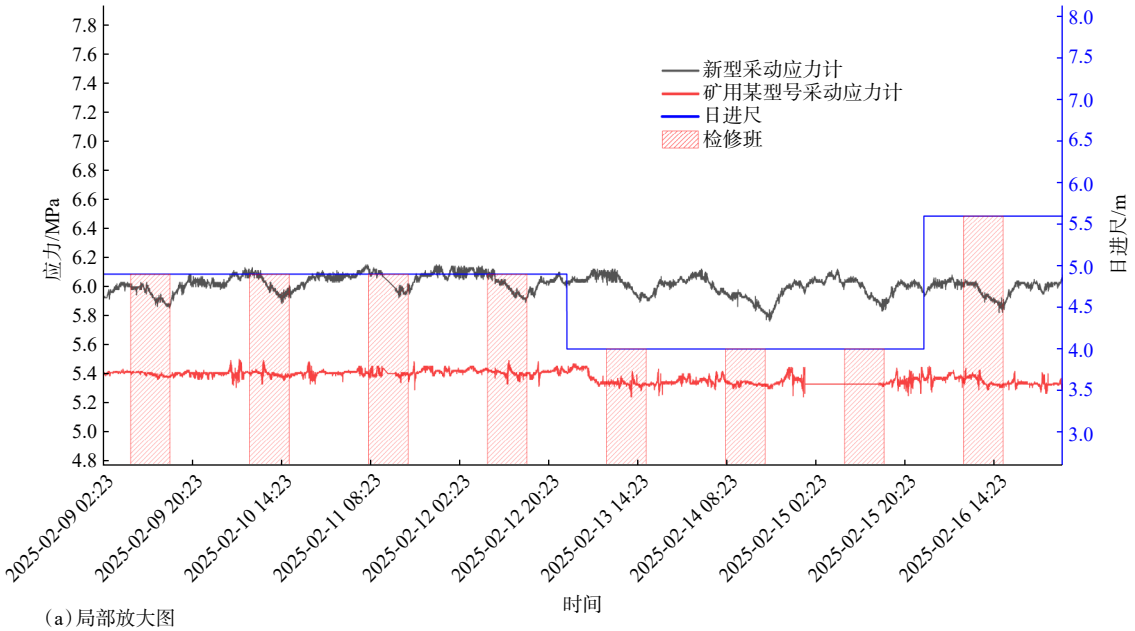
3.2　现场测试结果

现场监测显示，新型应力计对采动应力变化响应更为灵敏，能清晰捕捉到“生产班应力上升(峰值 6.2 MPa)—检修班应力下降(谷值 5.8 MPa)”的周期性波动，与作业周期密切相关；而对比组数据波动幅度大(±0.4 MPa)，并且多次出现数据跳变和漏液问题。在停采期(1 月 25 日—2 月 8 日)，新型采动应力计数据稳定性显著优于对比组。

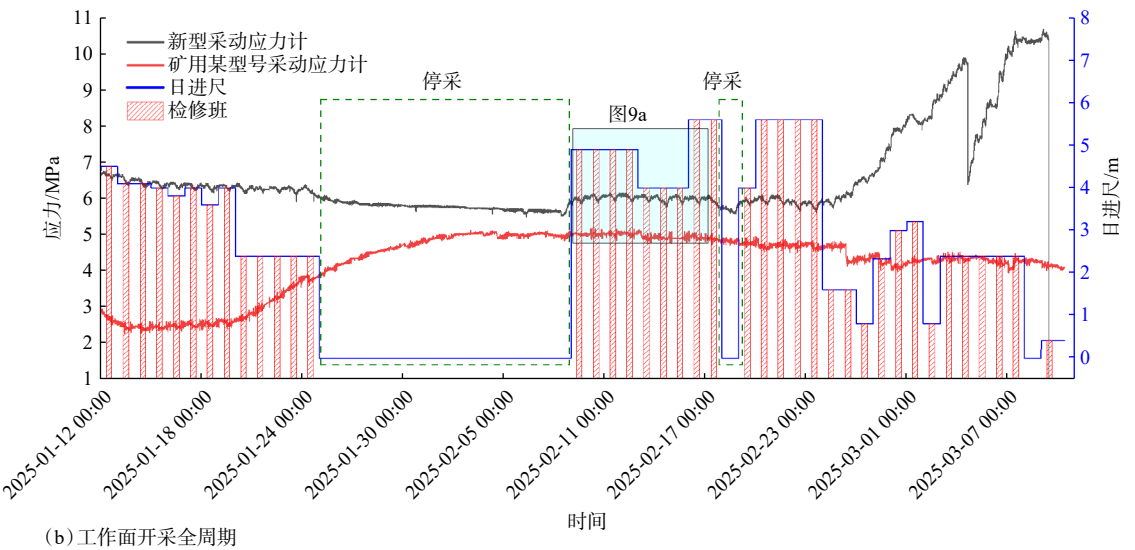
新型采动应力计表现出与开采活动的强关联性，回采班期间，由于采煤机进行回采作业和工作面推进，新型应力计监测到的应力值显著上升(图 9a)。具体表现为：生产班期间(16:00—次日 8:00)，新型应力计应力值从 5.8 MPa 持续上升至 6.5 MPa；而检修班期间(8:00—16:00)，应力值出现回落，图中红色阴影标示出检修班时段应力明显下降。

采动应力的动态演化过程(图 9b)，停采期间(1 月 25 日—2 月 8 日)，新型应力计监测的压力值稳定在 5.3 MPa 左右，无显著波动；相较之下，某型号采动应力计则表现出波动幅度较大、规律性差等特点，对采动应力变化的响应迟缓，无法及时准确反映应力实时动态。2 月 24 日，当工作面推进至测点前方 25 m 位置时，新型应力计压力从初始值 5.8 MPa 开始显著上升；随着工作面持续推进，应力呈增长趋势，最高达到 10.4 MPa，相当于初始应力的 1.8 倍。

现场监测工作面距测点距离与应力的关系(图 10)显示，超前支承压力的影响范围总长度为 27 m，符合厚煤层长壁开采超前支承压力影响范围较大的一般规律。当工作面推进至距离监测点约 10 m 时，顶板发生周期性断裂(来压)，导致高位岩层施加的载荷转移和释放，引起应力计监测到的压力值出现 2.1 MPa 的骤降(10.4 MPa→8.3 MPa)。该监测结果与矿井现场来压情况相符。



(a) 局部放大图



(b) 工作面开采全周期

图 9 应力计与日进尺变化曲线图

Fig. 9 Variation curves of stress gauge and daily footage

(a) Partial enlarged view; (b) Full life cycle of working face mining

3.3 应力计非均质硬岩稳定性测试

金属矿山多以硬岩为主，开采深度大、矿柱结构复杂，且常采用空场法、留矿法等，对围岩稳定性要求更高的工艺。其地压演化规律与煤矿的层状岩体应力分布存在本质区别。排山楼新民矿区作为典型的金属矿山，其矿柱回收过程中面临空区跨度大、岩体破碎带发育等问题，传统煤矿应力监测技术难以适应硬岩环境下的应力突变的响应需求。因此，该研究在排山楼新民矿区开展现场测试，以验证新型应力计在非均质硬岩、高应力集中区等复杂条件下的适应性与可靠性，填补该设备煤矿以外场景的技术空白，拓展应力监测技术的工程应用边界。

排山楼新民矿区位于辽宁阜新市，是典型的黄金开采区，采用浅孔留矿法进行矿柱回收，开采范围涉及 223 m、180 m、140 m 与 105 m 共 4 个中段。矿区岩体以白云质糜棱岩、长英质糜棱岩为主，单轴抗压强度达 72.94～103.41 MPa，属中硬—硬岩范畴。180 m 中段作为矿区的关键开采层位，其矿房走向长度 50～60 m，间柱宽度 7～10 m，空区跨度最大达 62.37 m。且该区域上位采区已形成多年采空区，岩体应力场受上下中段开采扰动影响显著。新

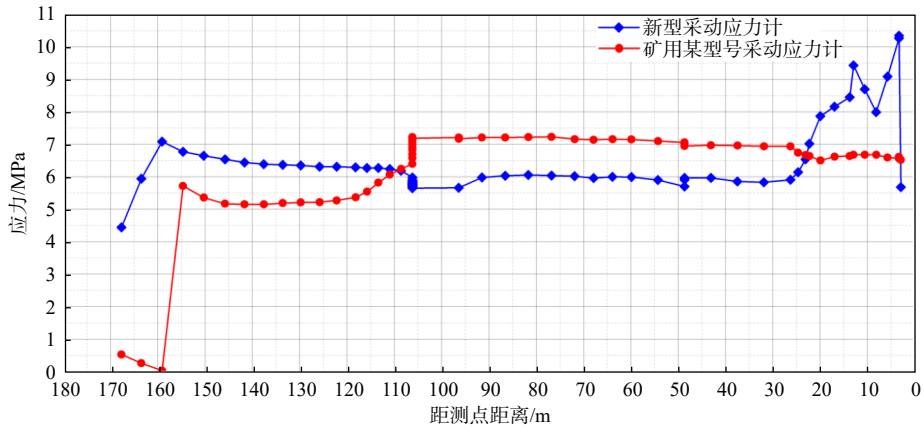


图 10　工作面距测点位置图

Fig. 10　Location diagram of the working face relative to the measurement point

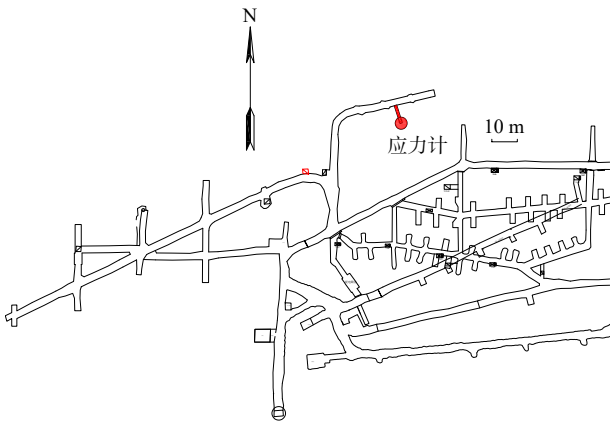


图 11　排山楼新民矿区应力计安装位置示意图

Fig. 11　Schematic diagram of the installation location of the stress gauge in Paishanlou Xinmin mining area

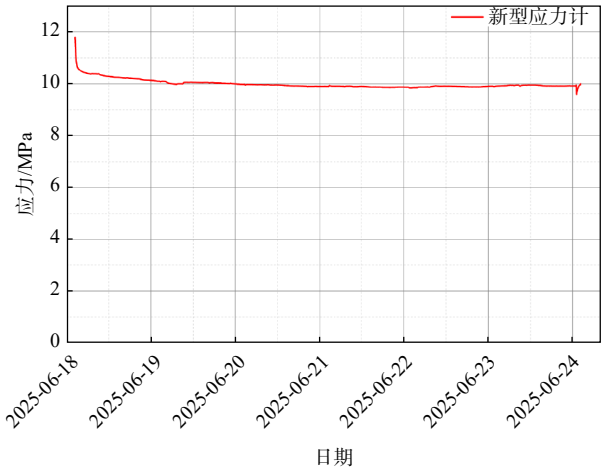


图 12　排山楼新民矿区新型应力计测试曲线图

Fig. 12　Test curve of the novel stress gauge in Paishanlou Xinmin Mining Area

型应力计在 180 m 中段开展测试，布设位置如图 11 所示。

新型应力计测试数据（图 12）显示，应力计安装后经初次打压，压力在 1 小时内快速平衡，随后数据趋于稳定，应力值基本维持在 10 MPa 左右小幅波动。截至 6 月 24 日，虽出现细微变化（波动约 0.3 MPa，应力值范围 9.8～10.3 MPa），但整体稳定性未受影响，波动值仅占岩体强度（长英质糜棱岩 91.21 MPa）的 0.33%，充分展现新型应力计在金属矿山硬岩环境下具备精准捕捉应力动态变化、实现长期稳定监测的性能优势。后续将持续监测，为矿山安全开采提供更全面数据支撑。

4　讨论

新研发的体积式采动应力传感器在实验室和现场测试中均表现出优异的性能。以下结合实验结果，对该应力计的核心优势与技术瓶颈进行深入讨论。

与依赖于“点–线”接触和单轴感知的传统扁平槽法、液压枕式或振弦式应力计不同，该应力计采用“围岩–黏合剂–传感器”全耦合结构，实现了对钻孔围岩体积应变的直接测量。如理论模型所示，其输出信号 ΔP 与外部应力 p 呈线性关系，该特性在实验室线性度测试（R^2=0.994）中得到了验证，同时其灵敏度（0.456）显著优于传统应力计。在现场应用中，该应力计成功捕捉到顶板断裂引发的应力骤降现象，此类信号在以往其他应力计的监测中较为罕见。

现有应力监测设备在坚硬、均质的岩体中表现良好，但因其依赖弹性介质假设和精密安装工艺，在破碎、流变性强的煤体中极易失效。新型体积式

采动应力传感器通过测量体积应变来捕捉应力场整体强度的变化趋势，更关注应力的相对变化率、波动幅度和突变前兆，而非绝对值的精确解。此外，实验室与现场长达数月的稳定性测试表明，其性能不受煤体蠕变和界面滑移的影响，克服了传统液压式应力计需定期补压、校准的缺点。在金属矿硬岩环境中的初步测试结果，进一步验证了其原理的普适性。

尽管该应力计性能优异，但仍存在一些局限性，需要在未来研究中加以完善。首先，传感器输出的 ΔP 是围岩力学参数与结构参数的函数，因此围岩力学参数的准确性直接影响应力反演的精度。其次，温度变化对应力输出存在一定干扰。尽管实验室中可通过线性公式进行补偿，但井下温度数据获取困难，限制了现场温度补偿的有效实施。为此，后续计划在应力计中集成温度传感器，实现应力与温度的同步监测，从而更精准地消除温度效应的影响。

值得注意的是，应力计的高灵敏度特性使其在煤层钻孔卸压或爆破卸压效果检验方面具有应用潜力。通过实时监测卸压过程中应力的变化，可为卸压效果的定量评价与参数优化提供可靠的数据支持。

5 结论

（1）新研发的体积式采动应力计采用全封闭液压传感结构，由压力传感器、高压油管及油阀连接器组成。通过黏合剂与钻孔围岩实现完全耦合，构建“煤岩体−黏合剂−传感器壳体”耦合体系，将围岩体积应变（$\Delta V/V$）转化为液压腔油压变化（ΔP）。基于弹性力学平面应变理论，明确了传感器输出与外部应力的线性关系，为灵敏度标定和参数优化提供了理论支撑。

（2）实验室性能测试表明，该应力计输出压力与外部应力呈高度线性关系（R^2=0.99），灵敏度达0.456，显著优于传统应力计。其长期稳定性测试结果显示，在30 d监测周期内未出现大幅跳变或持续偏离现象，现场连续测试3个月无需补压。针对深部开采温度变化问题，温度特性实验揭示了温度与压力变化的线性关系，验证了温度补偿公式的普适性，为实际应用中的温度干扰校正提供了依据。

（3）在陕西彬长矿区雅店煤矿的现场应用中，该应力计对顶板断裂等突发应力事件的响应速度与精度显著优于传统设备，监测数据与微震结果强相关，准确反映超前支承压力演化规律；在辽宁排山楼新民矿区硬岩环境中，监测应力波动仅0.3 MPa，验证了在非均质硬岩、高应力集中区具备长期稳定监测能力，适配金属矿山空场法、留矿法等工艺对围岩稳定性的监测需求。

（4）该应力计显著提升了在非均质介质中采动应力监测的灵敏度和稳定性，可高效捕捉动力灾害前兆信息。基于其在矿山岩体条件下的稳定性表现，该设备未来有望在深埋矿山动力灾害预警、隧道岩爆监测、大型水电工程围岩稳定性评估等领域推广应用，为深部地下工程安全保障提供可靠技术支撑。

References

AMADEI B, 1985. Applicability of the theory of hollow inclusions for overcoring stress measurements in rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 18(2): 107-130.

BRADY B H G, BROWN E T, 2006. Rock mechanics: for underground mining[M]. 3rd ed. Dordrecht: Springer.

BROYLES L W, CASSAN J T, 1968. Bulk modulus investigation – hydraulic fluid stiffness (AFAPL-TR-68-14)[R]. Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Aero Propulsion Laboratory.

CAI M F, QIAO L, LI H B, 1995. Principles and techniques of in situ stress measurement[M]. Beijing: Science Press: 1-27. (in Chinese with English abstract)

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2015. Test methods of the performances for pressure transducer/sensor: GB/T 15478-2015 [S]. Beijing: China Standard Press.

GILLEY J L, SPOREIC R, ZONA A, 1964. Progress in the application of encapsulated cells in a coal mine subject to coal bursts[C]//Proceedings of the 6th U. S. symposium on rock mechanics. Rolla: University of Missouri: 649-667.

KELLER C, LOWRY W, 1990. The use of the CALIP gauge for those difficult measurements of rock stress[M]//HUSTRULID W, JOHNSON G A. Rock mechanics contributions and challenges. London: CRC Press: 573-577.

KUTZ M, 2015. Mechanical engineers' handbook: energy and power[M]. Hoboken: Wiley.

LIU W J, LIU Y, PAN G H, 2019. Study on the method of determining the stopping line of working face based on stress monitoring system[J]. Coal Engineering, 51(6): 112-115. (in Chinese with English abstract)

LU P H, 1981. Determination of ground pressure existing in a viscoelastic rock mass by use of hydraulic borehole pressure cells[C]//Proceedings of the ISRM international symposium. Tokyo: ISRM: 459-465.

LU P H, 1984. Mining-induced stress measurement with hydraulic borehole

pressure cells[C]//Proceedings of the 25th U. S. symposium on rock mechanics. Evanston: American Rock Mechanics Association.

MA J J, LI H L, 2021. Development of miniaturized volume borehole strain instrument[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 41(2): 217-220. (in Chinese with English abstract)

National Coal Mining Safety Administration, 2018. Notification on issuing the "regulations on the prevention and control of impact ground pressure in coal mines": coal mine safety supervision equipment (2018) 8[EB/OL]. Beijing: National Coal Mine Safety Administration, (2018-05-02)[2025-05-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-12/09/content_5459585.htm. (in Chinese with English abstract)

NEWMAN D A, 1989. *In situ* yield behaviour of a coal pillar[J]. International Journal of Mining and Geological Engineering, 7(2): 163-170.

OBERT L, DUVAL W I, 1967. Rock mechanics and the design of structures in rock[M]. New York: Wiley.

PANEK L A, HORNSEY E E, LAPPI R L, 1964. Determination of the modulus of rigidity of rock by expanding a cylindrical pressure cell in a drillhole[C]//Proceedings of the 6th U. S. symposium on rock mechanics. Rolla: ARMA: 351-365.

PANEK L A, STOCK J A, 1964. Development of a rock stress monitoring station based on the flat slot method of measuring existing rock stress[R]. Washington: United States Department of the Interior, Bureau of Mines.

PANEK L A, 1973. Solution of mine structure problems through field measurements and theoretical analysis[C]//Proceedings of the rock mechanics instrumentation for mine design. Washington: U. S. Bureau of Mines: 23-34.

SALVINI R, ERMINI A, DE LUCIA V, et al., 2022. Stress–strain investigation of the rock mass based on overcoring with CSIRO HI cell test and numerical modeling: a case study from an Italian underground marble quarry[J]. Geosciences, 12(12): 441.

SONG G D, LIU T Y, WANG C, 2012. Deep dynamic disaster prediction technologies based on mining-induced stress monitoring[J]. China Mining Magazine, 21(S1): 520-522. (in Chinese with English abstract)

SU K Z, 2003. Status and developments of borehole strain observations in China[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 24(1): 65-69. (in Chinese with English abstract)

SWOLFS H S, BRECHTEL C E, 1977. The direct measurement of long-term stress variations in rock[C]//Proceedings of the 18th U. S. symposium on rock mechanics. Golden: ARMA: 4C5-1-4C5-3.

WOROTNICKI G, 1993. CSIRO triaxial stress measurement cell[M]//HUDSON J A. Rock testing and site characterization: principles, practice and projects. Amsterdam: Elsevier: 329-394.

XIA F Q, WEI Q D, GUO Y M, et al., 2020. Design and application of flexible borehole stressmeter[J]. Coal Engineering, 52(4): 161-165. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z G, ZHANG Q H, LIU J, 2024. Research progress and prospects of coal and gas outburst and composite dynamic disaster warning systems in China[J]. Journal of China Coal Society, 49(S2): 911-923. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

蔡美峰，乔兰，李华斌，1995. 地应力测量原理和技术[M]. 北京：科学出版社：1-27.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 2015. 压力传感器性能试验方法：GB/T 15478—2015[S]. 北京：中国标准出版社.

国家煤矿安监局，2018. 防治煤矿冲击地压细则：煤安监技装[2018]8号[EB/OL]. 北京：国家煤矿安全监察局，(2018-05-02)[2025-05-16]. https：//www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-12/09/content_5459585.htm.

刘伟建，刘晔，潘贵豪. 基于应力监测系统的工作面终采线确定方法研究[J]. 煤炭工程，2019，51(6)：112-115.

马京杰，李海亮，2021. 小型化体积式钻孔应变仪的研制[J]. 大地测量与地球动力学，41(2)：217-220.

宋广东，刘统玉，王昌，2012. 基于采动应力监测的深部动力灾害预测技术[J]. 中国矿业，21(S1)：520-522.

苏恺之，2003. 我国钻孔应变观测的回顾与展望[J]. 地震地磁观测与研究，24(1)：65-69.

夏方迁，魏全德，郭延淼，等，2020. 柔性钻孔应力计设计及实验应用研究[J]. 煤炭工程，52(4)：161-165.

张志刚，张庆华，刘军，2024. 我国煤与瓦斯突出及复合动力灾害预警系统研究进展及展望[J]. 煤炭学报，49(S2)：911-923.