

正交试验设计的 FBG 测力锚杆结构封装优化及应用

梁敏富^{1,2,3}, 方新秋^{1,2}, 陈宁宁^{1,2}, 吴刚^{1,2}, 薛小妹⁴, 宋扬^{1,2}, 张璠^{1,2}

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 智能化开采研究中心,江苏 徐州 221116;3.中国矿业大学 经济管理学院,江苏 徐州 221116;4.中国矿业大学 信息与控制工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:煤矿智能化开采是我国煤炭开采技术发展的新阶段,智能感知又是煤矿智能化开采的核心技术之一。针对深部巷道变形速度快、变形量大、底臃严重、难以形成统一的指导性锚杆支护方案等问题,提出一种能感知锚杆杆体轴力的 FBG 传感器及围岩状态感知监测系统。基于光纤光栅传感基本原理,研究了 FBG 测力锚杆的关键技术,包括测力锚杆的结构设计、测力锚杆的工作原理和应变传递机理;对比分析了基体表面粘贴封装和基体刻槽封装的 FBG 传感器应变传递规律,揭示了 FBG 传感器的应变传递变化规律及影响因素。运用正交试验法探究了黏结剂的剪切模量、凹槽的形状以及光纤光栅的粘贴长度对应变传递效率的影响特征,提出 9 种试验方案,并设计 3 组锚杆拉伸试验以获得测试结果。通过极差分析得到:按照对应变传递效率影响大小排序,黏结剂种类对应变传递效率造成的影响最大,其次为凹槽形状和光纤光栅粘贴长度;确定了最优封装方案,即使用 AB 环氧树脂胶,凹槽形状为半圆形且粘贴长度为 100 mm 时应变传递效率最大。通过方差分析得到:黏结剂种类对应变传递效率的作用显著,其次为凹槽形状,光纤光栅粘贴长度对应变传递效率的作用不显著。在寺家庄矿 15106 回风巷建立了围岩状态感知监测系统并进行测试,应用效果显著。

关键词:传感器封装技术;测力锚杆;正交试验;光纤光栅;应变传递

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)08-2950-11

Structure packaging optimization and application of FBG dynamometry bolts based on the orthogonal test design

LIANG Minfu^{1,2,3}, FANG Xinqiu^{1,2}, CHEN Ningning^{1,2}, WU Gang^{1,2}, XUE Xiaomei⁴,
SONG Yang^{1,2}, ZHANG Fan^{1,2}

(1.School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2.Research Center of Intelligent Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3.School of Economics and Management, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 4.School of Information and Control Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Intelligent coal mining is a new stage in the development of coal mining technology in China and intelligent perception is one of the core technologies of intelligent coal mining. Aiming at the problems of fast deformation speed, large deformation and serious floor heave of deep roadway, which make it difficult for technicians to plan a unified guiding bolt support scheme, a FBG sensor and a surrounding rock state perception monitoring system capable of

收稿日期:2022-04-20 修回日期:2022-07-09 责任编辑:张晓宁 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.0548

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874276, 52004273);江苏省自然科学基金青年基金资助项目(BK20200639)

作者简介:梁敏富(1988—),男,安徽淮北人,博士后。E-mail:lmf2012@163.com

通讯作者:方新秋(1974—),男,浙江永康人,教授,博士生导师。E-mail:xinqiu@163.com

引用格式:梁敏富,方新秋,陈宁宁,等.正交试验设计的 FBG 测力锚杆结构封装优化及应用[J].煤炭学报,2022,47(8):2950-2960.

LIANG Minfu, FANG Xinqiu, CHEN Ningning, et al. Structure packaging optimization and application of FBG dynamometry bolts based on the orthogonal test design[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2950-2960.



移动阅读

sensing the axial force of bolt body are proposed. Based on the basic principle of fiber grating sensing, the key technologies of FBG dynamometry bolts are studied, including the structural design of dynamometry bolts, the working principle and strain transfer mechanism of dynamometry bolts. The strain transfer laws of the FBG sensor with surface-mounted package and with grooved package is analyzed. The laws and influencing factors of strain transfer for the FBG sensor is obtained. The effect of the elastic modulus of the adhesive, the shape of the groove and the bonding length of the fiber grating on the strain transfer efficiency is studied by the orthogonal test method. Nine test schemes and three sets of bolt tension test are designed for testing simultaneously. The extreme value calculation results show that in order of the effect on strain transfer efficiency, the type of binder has the greatest impact on strain transfer efficiency, followed by groove shape and fiber grating bonding length. The strain transfer efficiency is the highest when AB epoxy resin adhesive is used, the groove shape is semicircular and the bonding length is 100 mm. The variance calculation results show that the type of adhesive has a significant effect on the strain transfer efficiency, followed by the groove shape and then the effect of the fiber grating bonding length on the strain transfer efficiency is not significant. Finally, a surrounding rock state perception monitoring system was carried out in the return airway 15106 in Sijiazhuang coal mine, and the application effect was remarkable.

Key words: sensor encapsulation technology; dynamometry bolt; orthogonal test; fiber Bragg grating; strain transfer

煤炭作为我国的能源战略资源,是能源安全与国民经济发展的重要支柱。经过长期大规模的煤炭开采,浅部资源日益枯竭,煤炭开采深度以 10~25 m/a 的速度持续向深部延伸,平均采深已达 700 m 左右,最深的矿井已经超过 1 500 m^[1-2]。深部巷道具有变形速度快、变形量大、底臃严重等特点,使得巷道维修成本大增,也对巷道支护技术提出更高要求。从工程实践来看,不同矿井或同一矿井不同区域巷道的岩层性状不同,难以形成统一的指导性支护方案。因此,有必要建立巷道围岩状态感知系统,实时采集巷道矿压数据,确定合理、经济的最优锚杆支护方案。

锚杆支护已经成为煤矿行业运用最广泛的主动支护方式,给我国煤矿带来巨大的经济效益^[3]。目前应力波无损检测法^[4]、瞬变电磁法^[5]、红外辐射检测法^[6]等技术手段用于检测锚杆工作状态。根据现场应用效果,测力锚杆监测锚杆杆身受力情况得到广泛认可。常规的测力锚杆可分为电测式和机械式^[7-8],电测式测力锚杆以电阻应变式为主,现场应用最多。上述检测手段抗电磁干扰能力弱,需要人工采集数据,不方便组建传输网络,不易实现在线监测。

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代伴随光纤制造和光纤通信技术迅速发展而兴起的一种以光波为载体进行感知和测量的新型传感技术^[9]。当检测对象的受力状态或温度环境发生变化时,光在光纤中的传输特性,如波长、相位、振幅、偏振态等也将随之产生相应的变化,通过反射光的调制和检测,便能捕捉、感知外界物理量的变化信息。光纤传感器采用光源,本质安全,对于煤矿井下瓦斯监测和长距离多点井筒变形、巷道围岩变形、采场应力等在线监测具有独特优

势^[10]。光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的应变、温度、压力、位移、加速度等传感器,以及光纤分布式传感器将在日益兴起的智能矿山建设中发挥巨大作用^[11-13]。一些学者也对光纤光栅测力锚杆进行了研究,梁敏富等^[14]研究了表贴式光纤光栅测力锚杆应变感知机理,将黏结层简化为标准线性固体模型,建立光纤光栅剪切应变传递的力学分析模型。CHAI 等^[15]采用 PPP-BOTDA 技术和光纤光栅传感技术测试锚杆在拉拔载荷下的传感性能,分析了锚杆轴向应力的分布特征。WANG 等^[16]设计了一种全长锚固 FBG 测力锚杆及监测系统,在锚杆杆身上开设一对称分布的梯形凹槽,用于埋设光纤光栅,得到锚杆轴向力与光纤光栅波长变化之间的转换公式。DONG 等^[17]基于光纤光栅传感原理设计一种 FBG 锚杆应力传感器,并进行了实验室标定,为巷道锚杆支护参数的动态监测提供新的解决思路。ZHAO 等^[18]研究了凹槽形态和黏结剂材料对 FBG 测力锚杆的影响,通过锚杆拉伸试验和有限元分析的方法分析了无凹槽、U 形凹槽、梯形凹槽和 V 形凹槽对锚杆强度的影响,得到 FBG 测力锚杆凹槽优选梯形槽。上述研究缺少对 FBG 传感器结构封装优化方案的探讨,而传感器的封装方式对传感器精度、灵敏度和稳定性等传感特性至关重要。因此,亟需在 FBG 测力锚杆的封装技术领域提出新的解决办法。

笔者基于光纤光栅传感基本原理,研究 FBG 测力锚杆的关键技术,包括测力锚杆的结构设计、工作原理和应变传递规律,确定黏结剂的剪切模量、凹槽的形状以及光纤光栅粘贴长度与 FBG 传感器的应变传递效率相关性;通过正交试验方法提出 9 种测试方

案,并设计3组锚杆拉伸试验,经极差和方差计算分析,确定最优的封装方案,为FBG传感器封装方式提供了新思路;并在山西阳煤寺家庄矿15106回风巷进行了现场试验,效果显著。

1 光纤光栅传感基本原理

光纤光栅是指利用强紫外光曝光方法改变掺锗光纤纤芯结构,在纤芯轴向方向形成折射率周期变化、等距均匀分布的相位光栅的一段光纤。光纤光栅反射波长的基本关系式^[19]为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

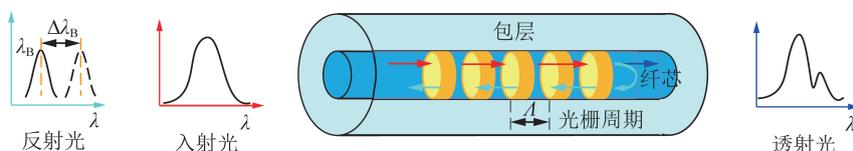


图1 光纤光栅传感原理

Fig.1 Fiber Bragg grating sensing principle

当光纤只受轴向应力作用时,反射光的中心波长变化量与光栅所受的轴向应变关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon = K_e\varepsilon \quad (2)$$

式中, $\Delta\lambda_B$ 为反射光中心波长漂移量,mm; ε 为光栅的轴向应变; P_e 为光纤材料的弹光系数,对于石英光纤, $P_e=0.22$; K_e 为光纤光栅轴向应变与中心波长漂移量的灵敏度系数。

当光纤只受温度作用时,反射光的中心波长变化量与温度的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (3)$$

式中, α 为热膨胀系数; ζ 为热光系数; ΔT 为温度的变化量。

当光纤受到轴向应力和温度的共同作用时,反射光的中心波长变化量与自变量的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (4)$$

为消除温度对测量结果的影响,常附加一个不受力的光纤光栅传感器作温度补偿。

2 测力锚杆监测的关键技术

2.1 测力锚杆的结构设计

(1)锚杆杆体。尺寸为 $\phi 22\text{ mm} \times 2\ 200\text{ mm}$,采用MG500高强度矿用锚杆材质,该锚杆屈服强度为560~595 MPa,抗拉强度为685~715 MPa,伸长率为24%~29%。如图2所示,在杆体表面铣出一个半径

式中, λ_B 为光纤光栅反射光的中心波长; n_{eff} 为纤芯有效折射率; Λ 为光纤光栅周期。

光纤光栅传感器的原理结构如图1所示,当宽谱光源发射的光经过光栅时,满足式(1)光栅波长条件的光被反射回来而形成反射光,其余光发生透射,反射光经过系列光学元件被解调出来,得到反射光中心波长的峰值。当光纤光栅做探头测量外界的温度、压力或应力时,光栅部分的 Λ 和 n_{eff} 发生变化,从而使反射波波长产生偏移。反射波波长的变化与外界物理量的变化遵循一定规律,即可通过测得的光纤光栅中心波长的变化推导出外界温度、压力或应力。

为2 mm的半圆形凹槽,再以锚杆端头300 mm开始布设和粘贴光纤光栅,相邻两段光栅间隔300 mm,一根光纤上布设6组光栅,最后用黏结剂将半圆形凹槽密封。FBG6为温度补偿光纤光栅,套设在套管内,防止光纤与锚杆杆体直接接触。

(2)光纤尾纤。光纤尾纤从锚杆尾部引出,与光纤接线盒连接以传输信息。

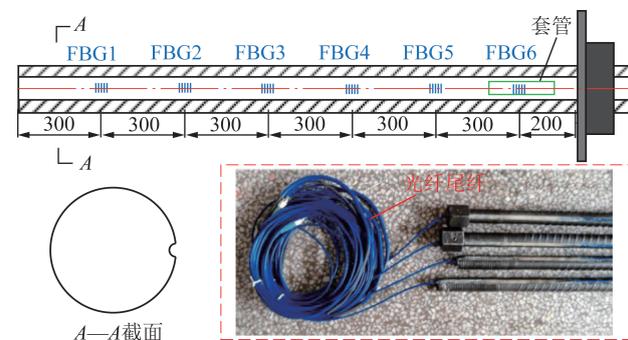


图2 光纤光栅测力锚杆结构

Fig.2 Structure of FBG force-measuring bolt

2.2 测力锚杆工作原理

光纤光栅测力锚杆作为感知构件锚固于围岩中,当围岩发生位移变形时,锚杆为约束围岩变形而受到围岩对锚杆的反作用力。锚杆杆体上的应力通过黏结剂以剪切应力形式作用到光纤纤芯上,纤芯受力引起光栅栅格周期和光纤折射率变化,携带锚杆应变信息的反射光信号通过光纤传输网络将光信号传输至光纤交换机主机,经解调设备处理后,光信号被转变为电信号,通过井下环网传输到地面服务器的数据库,技术管理人员通过专用光纤在线监测软件可随时

调取数据库中监测数据,形成可视化的图形和报表。

锚杆杆体应变与光纤光栅应变的关系为

$$\varepsilon_g = \eta \varepsilon_r \quad (5)$$

式中, ε_g 为光纤光栅感知的应变; ε_r 为锚杆杆体上的应变; η 为锚杆杆体应变与光纤光栅感知应变之间的传递系数。

锚杆杆体上各点的轴力为

$$F_{z,i} = \frac{1}{4} \pi D_1^2 E \varepsilon_i \quad (6)$$

式中, $F_{z,i}$ 为锚杆杆体第 i 点处的轴力, kN; E 为锚杆的弹性模量, MPa; ε_i 为锚杆杆体上第 i 点处的应变; D_1 为锚杆直径。

根据材料力学知识^[20]有

$$\varepsilon = \frac{F_z}{EA} \quad (7)$$

式中, A 为锚杆的横截面积。

进而得到锚杆轴力 F_z 与光纤光栅中心波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 之间的关系式为

$$F_z = \frac{EA}{\lambda_B K_g} \Delta\lambda_B \quad (8)$$

假设锚杆变形前、后横截面保持不变,因此锚杆的横截面积 A 可看作常数。由式(8)可以看出,锚杆某点处的轴力与该点处的光纤光栅中心波长漂移量成正比。

假设锚杆杆体临近两点间所受轴力差 ΔF_z 与应变在 (a, b) 长度上的积分等效,即

$$\Delta F_z = \int_a^b 2\pi r l \varepsilon dl \quad (9)$$

可推导出 (a, b) 长度上任意一点的应变为

$$\varepsilon = \frac{\Delta F_z}{2\pi r l} \quad (10)$$

式中, r 为锚杆半径, m; l 为 (a, b) 间的长度, m。

2.3 FBG 传感器基体表面粘贴封装和基体刻槽封装的应变传递对比分析

2.3.1 表贴式光纤光栅应变传递

FBG 传感器的表贴式封装是指用黏结剂将裸光纤光栅(不包括涂覆层)直接粘贴在基体表面的一种封装方式。表贴式 FBG 传感器应变传递分析基于 COX^[21] 提出的应力传递剪滞理论,认为基体受力后以剪切应变的形式通过黏结层作用到光纤纤芯上。如图 3 所示,建立了基体-黏结层-包层-纤芯的剪切应变传递模型,图中, D_2 为黏结层宽度; H 为黏结层厚度; L 为光纤光栅粘贴长度; h 为光纤包层到基体的最小距离(中间层厚度); r_c, r_p 分别为纤芯的半径和包层的外半径。

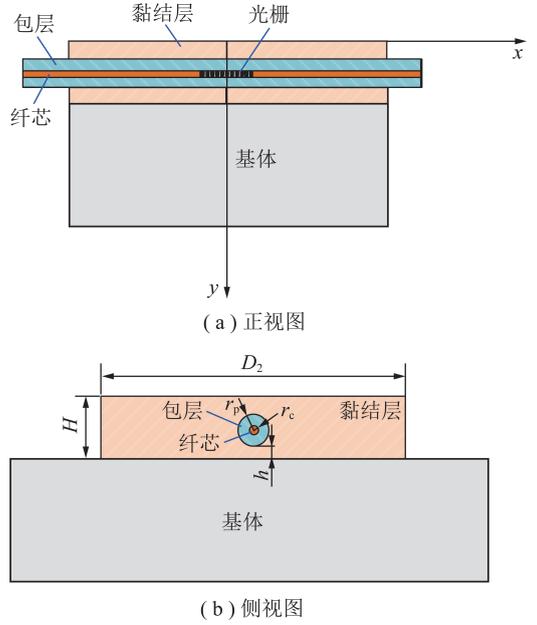


图3 表贴式 FBG 传感器应变传递分析模型

Fig.3 Strain transfer analysis model for surface-bonded FBG sensors

根据平衡微分方程,分别对纤芯微元体、包层微元体和黏结层微元体进行受力分析,再利用拉普拉斯逆运算,求得光纤光栅应变传递率 η ^[14,22] 为

$$\eta = \frac{\overline{\varepsilon_g}}{\varepsilon_0} = 1 - \frac{2 \tanh(k_1 L / 2)}{k_1 L} \quad (11)$$

式中, $\overline{\varepsilon_g}$ 为光纤光栅有效黏贴长度范围内的平均应变,也即光纤光栅感知的应变; ε_0 为 FBG 传感器基体的初始应变; k_1 为特征值。

将黏结层简化为标准线性固体模型,该模型由一个弹簧模型和一个 Kelvin 模型串联,在外力的响应下表现出弹性固体和黏性液体的力学性质,如图 4 所示,其中, E_{a1}, E_{a2} 分别为弹簧单元和 Kelvin 单元的弹性模量; η_2 为 Kelvin 单元的黏度系数; σ 为标准线性固体模型受到的正应力。

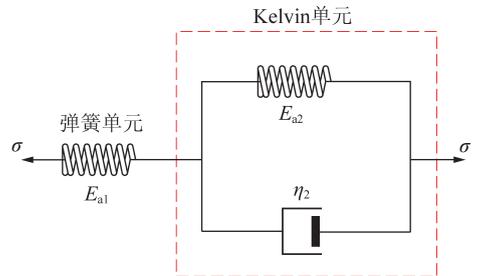


图4 标准线性固体模型

Fig.4 A standard linear solid model

根据拉普拉斯变换初值定理,得到式(11)中特征值 k_1 为

$$k_1 = \left[\frac{1}{2G_{a1}} \frac{(2\pi r_p + D_2)r_p E_c h}{4D_2} + \frac{(r_p + r_c)r_p E_c}{4G_p} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中, G_{a1} 为弹簧单元的剪切模量; G_p 为包层剪切模量; E_c 为光纤的弹性模量。

表 1 理论方程中各参数取值

Table 1 Values of each parameter in theoretical equation

黏结层剪切模量 G_{a1}/GPa	包层剪切模量 G_p/GPa	黏结层长度 L/mm	黏结层宽度 D_2/mm	中间层厚度 h/mm	裸光纤纤芯半径 $r_c/\mu\text{m}$	包层半径 $r_p/\mu\text{m}$	光纤的弹性模量 E_c/GPa
0.5~4.0	0.4	60~100	3~6	0~0.2	62.5	125	72

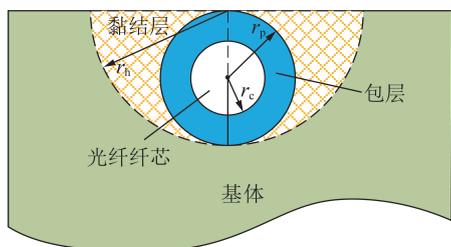


图 5 半圆形凹槽基体的光纤光栅封装结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the fiber grating packaging structure for the semicircular groove matrix

同样以光纤纤芯、光纤包层及黏结层为研究对象,取单位长度 dx ,进行力学平衡分析。如图 6 所示,受半圆形凹槽形状限制,黏结层沿光纤环向方向厚度不均,导致其内部剪切应力不均匀分布。 $\sigma_h(x)$, $\sigma_h(x) + d\sigma_h(x)$ 为黏结层微元体两端受到的正应力, $\tau_p(x)$ 为黏结层与包层之间的剪切应力, $\tau_h(x)$ 为黏结层与基质之间的剪切应力。

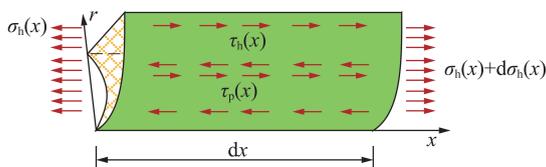


图 6 黏结层力学模型

Fig.6 Mechanical model of the bonding layer

为计算方便,将黏结层等效为外半径为 r'_h 、外表面受到剪切应力 $\tau'_h(x, r_h)$ 作用的圆环结构模型,如图 7 所示。

在黏结层的等效力学模型中,黏结层受力均匀,推导出半圆形凹槽形态下的光纤应变传递公式为

$$\eta = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_r} = \frac{\int_0^L \varepsilon_g(x) dx}{L\varepsilon_r} = 1 - \frac{2 \tanh(k_2 L/2)}{k_2 L} \quad (13)$$

$$k_2 = \left[\frac{1}{2} E_c r_c^2 \left(\frac{1}{G_p} \ln \frac{r_p}{r_c} + \frac{1}{G_h} \ln \sqrt{2} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

式(11), (12)中各参数取值见表 1。

2.3.2 半圆形凹槽基体的光纤光栅应变传递

魏世明^[23]推导出半圆形凹槽基体的光纤光栅应变传递公式,用于监测岩体变形。如图 5 所示,半圆形凹槽的半径 r_h 是光纤包层外半径 r_p 的 2 倍。

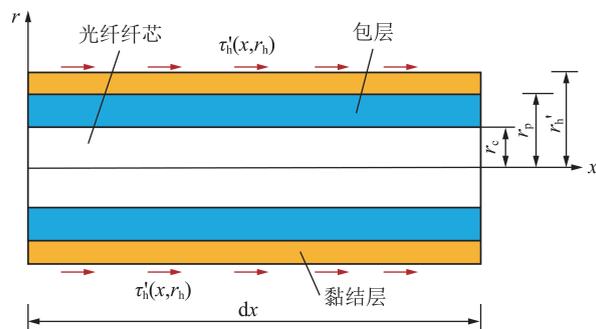


图 7 黏结层的等效力学模型

Fig.7 Equivalent mechanical model of the bonding layer

式中, ε_g 为光纤光栅感知的应变; ε_r 为锚杆杆体上的应变; E_c 为光纤的弹性模量; G_p 为包层剪切模量; G_h 为黏结层剪切模量; k_2 为另一特征值。

对比式(12), (14)可知,特征值 k_1, k_2 的大小与纤芯半径、包层外半径、黏结层外半径、包层剪切模量、黏结剂剪切模量以及光纤光栅粘贴长度等参数有关,而纤芯半径、包层外半径、包层剪切模量为常量。表贴式封装和凹槽粘贴封装的光纤光栅应变传递系数表达形式相同,区别在于特征值 k 的表达式。这是由于凹槽结构破坏基体原有的应力平衡状态,导致凹槽处应力重新分布,若凹槽为矩形、V 形或梯形,还会出现应力集中现象。另一方面,凹槽结构会影响黏结层外半径和黏结层内部剪切应力大小及分布状态,进一步影响光纤光栅的受力状态。以上 2 点也充分说明基体上凹槽结构形态会对光纤光栅传感器应变传递产生影响。

综上,确定黏结剂的剪切模量、凹槽形状以及光纤光栅的粘贴长度与 FBG 传感器的应变传递效率具有相关性。

3 测力锚杆应变传递影响因素正交试验

3.1 试验方案设计

正交试验设计方法(简称正交法)是利用正交表科学地挑选试验条件,合理安排试验方案,再利用极差和方差

的数学思想对试验结果进行分析,推断出最优方案^[24]。

经分析,影响测力锚杆的应变传递因素有 3 个:黏结剂的剪切模量、凹槽的形状以及光纤光栅的粘贴长度。其中,黏结剂的类型分为 3 水平(水平是指试验中选定的因素所处的状态和条件,也称位级),即 502 胶水、AB 环氧树脂胶和 504 胶水 3 种;凹槽的结构分为 3 水平,选择半圆形、矩形和 V 形 3 种形状;光纤光栅的粘贴长度也分为 3 水平,即 60, 80, 100 mm, 以应变传递效率作为正交试验结果的考查指标。

本正交试验为 3 因素 3 水平,可选用 $L_9(3^4)$ 正交表可设计 9 种试验方案,见表 2。黏结剂种类、凹槽形状和粘贴长度的试验结果分成 3 组,分别用 K_1, K_2, K_3 表示。例如, K_1 中, $K_{11} = y_1 + y_2 + y_3$, 表示黏结剂种类选择为 502 胶的试验结果之和; $K_{12} = y_1 + y_4 + y_7$ 表示凹槽形状为半圆形结构的试验结果之和; $K_{13} = y_1 + y_6 + y_8$ 表示粘贴长度为 60 mm 时的试验结果之和。 $\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3$ 分别为 K_1, K_2, K_3 的平均值^[25]。

表 2 因素水平

Table 2 Design of factor level table

试验 编号	影响因素			指标
	黏结剂种类	凹槽形状	粘贴长度/mm	
1	502 胶	半圆形	60	y_1
2	502 胶	矩形	80	y_2
3	502 胶	V 形	100	y_3
4	AB 胶	半圆形	80	y_4
5	AB 胶	矩形	100	y_5
6	AB 胶	V 形	60	y_6
7	504 胶	半圆形	100	y_7
8	504 胶	矩形	60	y_8
9	504 胶	V 形	80	y_9
K_1	$y_1 + y_2 + y_3$	$y_1 + y_4 + y_7$	$y_1 + y_6 + y_8$	$Y = \frac{1}{n} \times \sum y_i$
K_2	$y_4 + y_5 + y_6$	$y_2 + y_5 + y_8$	$y_2 + y_4 + y_9$	
K_3	$y_7 + y_8 + y_9$	$y_3 + y_6 + y_9$	$y_3 + y_5 + y_7$	
\bar{K}_1	$(y_1 + y_2 + y_3)/3$	$(y_1 + y_4 + y_7)/3$	$(y_1 + y_6 + y_8)/3$	$i = 1, 2, \dots, 9$
\bar{K}_2	$(y_4 + y_5 + y_6)/3$	$(y_2 + y_5 + y_8)/3$	$(y_2 + y_4 + y_9)/3$	
\bar{K}_3	$(y_7 + y_8 + y_9)/3$	$(y_3 + y_6 + y_9)/3$	$(y_3 + y_5 + y_7)/3$	

按照传统试验方法,根据排列组合原理要进行 27 次试验,表 2 只需进行 9 次试验即可对试验结果进行综合处理,不仅缩短了试验时间,而且在试验结果处理也极大方便。

3.2 试验装置及加载方式

本试验装置包括电液伺服万能试验机、光纤光栅传感解调仪、静态电阻应变仪、FBG 测力锚杆试样、计算机等,各设备的连接方式如图 8 所示。受万能试验机尺寸限制,无法实现对全长 FBG 测力锚杆的拉伸,所以试验使用 FBG 测力锚杆试样的尺寸为

$\phi 22 \text{ mm} \times 840 \text{ mm}$ 。沿锚杆杆体轴向铣出一个凹槽,凹槽的形状分别为半圆形、矩形和 V 形。如图 9 所示,杆体上布置 3 个监测点,从杆体左端 220 mm 处按从左到右的顺序设置 1 号、2 号和 3 号监测点,相邻监测点间距均为 200 mm,FBG 测力锚杆试样上各监测点的具体封装参数见表 3。每处监测点对应布置光纤光栅传感器和电阻应变片传感器(应变片直接粘贴在杆体表面)。这里将电阻应变片传感器测量的应变看作杆体的真实值 $\bar{\varepsilon}_r$,FBG 测力锚杆测量的应变为 $\bar{\varepsilon}_g$,应变传递效率由公式 $\bar{\eta} = \bar{\varepsilon}_g / \bar{\varepsilon}_r$ 计算得到。

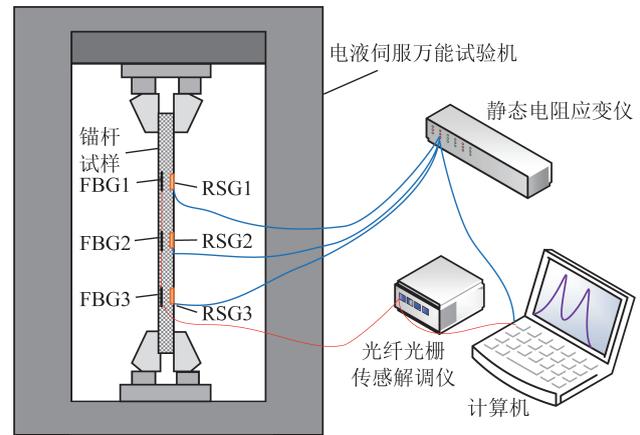


图 8 试验装置连接示意

Fig.8 Connection diagram of the test device

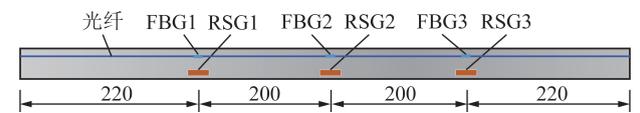


图 9 FBG 测力锚杆试样

Fig.9 Sample of the FBG dynamometry bolt

表 3 FBG 测力锚杆观测位置上的封装参数

Table 3 Packaging parameters at the monitoring position of FBG force measuring bolt

试样 类别	1 号监测点		2 号监测点		3 号监测点	
	黏结剂	粘贴长度/mm	黏结剂	粘贴长度/mm	黏结剂	粘贴长度/mm
半圆形	502 胶	60	AB 胶	80	504 胶	100
矩形	502 胶	80	AB 胶	100	504 胶	60
V 形	502 胶	100	AB 胶	60	504 胶	80

试验分别对半圆形、矩形和 V 形 3 类 FBG 测力锚杆试验进行拉伸,按照表 3 封装参数准备锚杆试样,进行 3 组拉伸试验,可得到 9 种正交试验方案的测试结果。试验加载方式为:先在 1 min 中内分别将载荷加载到 140 kN(锚杆试样处于弹性变形阶段,弹性极限为 170~180 kN),保持载荷不变,维持 10 min 后,再在 1 min 内将载荷卸载到 5 kN。

3.3 试验数据处理与分析

3.3.1 极差处理与分析

试验测试值和极差处理结果见表4,影响因素各水平平均值分布如图10所示。

表4 试验测试值和极差处理结果

Table 4 Test values and range treatment results

试验编号	黏结剂种类	凹槽形状	粘贴长度/mm	应变传递效率
1	502胶	半圆形	60	0.840 0
2	502胶	矩形	80	0.685 6
3	502胶	V形	100	0.751 3
4	AB胶	半圆形	80	0.907 9
5	AB胶	矩形	100	0.804 7
6	AB胶	V形	60	0.823 5
7	504胶	半圆形	100	0.704 4
8	504胶	矩形	60	0.589 6
9	504胶	V形	80	0.653 7
K_1	2.276 9	2.452 3	2.253 1	
K_2	2.536 1	2.079 9	2.247 2	
K_3	1.947 7	2.228 5	2.260 4	
\bar{K}_1	0.759 0	0.817 4	0.751 0	
\bar{K}_2	0.845 4	0.693 3	0.749 1	
\bar{K}_3	0.649 2	0.742 8	0.753 5	
极差 R	0.196 2	0.124 1	0.004 4	
主次顺序	黏结剂种类 > 凹槽形状 > 光纤光栅粘贴长度			
最优水平	AB胶	半圆形	100	

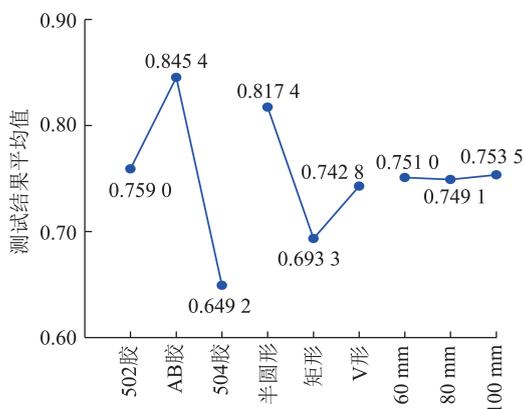


图10 影响因素各水平平均值分布

Fig.10 Distribution map of the average value of each level of the influencing factors

根据表4的极差计算结果,极差 R 得到的结果为 $0.196 2 > 0.124 1 > 0.004 4$,在变化的水平范围内,说明黏结剂种类对应变传递效率造成的影响最大,其次为凹槽形状和光纤光栅粘贴长度。从图10可看出,AB胶的均值最大,504胶的均值最小,说明黏结剂种类选择AB胶对应变传递效率的影响最显著;半圆形的均值最大,矩形的均值最小,说明凹槽结构选

择半圆形对应变传递效率的影响最显著;粘贴长度100 mm的均值最大,60 mm的均值最小,说明粘贴长度选择100 mm对应变传递效率的影响最显著。因此,使用AB环氧树脂胶、凹槽形状为半圆形且粘贴长度为100 mm时应变传递效率最大,为最优方案。在9种正交试验方案中,未给出“AB胶+半圆形+粘贴长度100 mm”的试验方案,通过计算分析即可选出最优方案,说明正交试验法的科学性和高效性。

3.3.2 方差处理与分析

极差分析法计算得到9种封装方案对应变传递效率的影响程度,但极差分析忽略了试验中偶然误差对试验结果的影响,而方差分析法可弥补其不足。

在方差分析计算^[26]中,总偏差平方和 S_T 为

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - Y)^2 \quad (15)$$

式中, n 为某因素的水平数, $n=3$; $i=1,2,3$ 。

$$f = n - 1 \quad (16)$$

$$S = \frac{S_T}{f} \quad (17)$$

$$F = \frac{S}{S_E} \quad (18)$$

式中, f 为自由度; n 为因素水平数; S 为因素均方差; F 为方差分析中的 F 值; S_E 为试验误差均方差。

对试验测试值进行方差分析,处理结果见表5。

表5 方差分析计算结果

Table 5 Variance analyze calculation results

方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	显著性
I (胶的种类)	$S_I = 0.057 97$	2	0.028 99	47.520	
II (凹槽形状)	$S_{II} = 0.023 40$	2	0.011 71	19.200	$F_{0.05}(2,8) = 19$
III (粘贴长度)	$S_{III} = 0.000 029 2$	2	$1.457 4 \times 10^{-5}$	0.024	
试验误差	$S_E = 0.001 24$	2	0.000 61		
总误差	$S_T = 0.082 64$	8			

注: $F_{0.05}(2,8)$ 由查表得到。

根据表5的方差计算结果, $F_I = 47.806 > F_{0.05}(2,8)$,说明胶的种类对应变传递效率的作用显著; $F_{II} = 19.319 > F_{0.05}(2,8)$,认为凹槽形状对应变传递效率的作用比较显著; $F_{III} = 0.024 < F_{0.05}(2,8)$,说明光纤光栅的粘贴长度对应变传递效率的作用不显著。该结论与极差分析结果一致,进一步验证了最优方案的正确性。但在工程实践中,还应考虑生产成本、加工难度、劳动条件等其他条件,选择符合实际生产需要的最优或较优方案。

4 现场工程应用

4.1 工程概况

寺家庄矿为华阳新材料科技集团公司主要生产矿井之一,矿井主采15号煤层,煤层平均埋深574 m。15106工作面设计南北方向布置,东侧为15108工作面采空区,西侧为15104工作面采空区,形成孤岛工作面。

15106工作面2条回采巷道均采用沿空掘巷方式,与邻近采空区留设7 m煤柱,回采巷道沿煤层顶板随

层掘进。其中,15106回风巷设计为矩形断面,宽×高为4.8 m×3.9 m,从巷道拨门口向里1 100 m范围内采用如图11(a)所示的巷道支护设计方案施工。根据巷道现场观测数据,在原有支护方案下,15106回风巷变形量较大,两帮最大移近量达1 560 m,顶底板最大相对移近量达900 mm。为使该巷道达到正常使用要求,巷道拨门口向里1 100 m至开切眼段改用图11(b)的优化支护设计,并引进巷道围岩状态光纤智能感知成套设备及监测系统,实时获取巷道支护设计变换前后的矿压数据,以检验优化支护设计的实施效果。

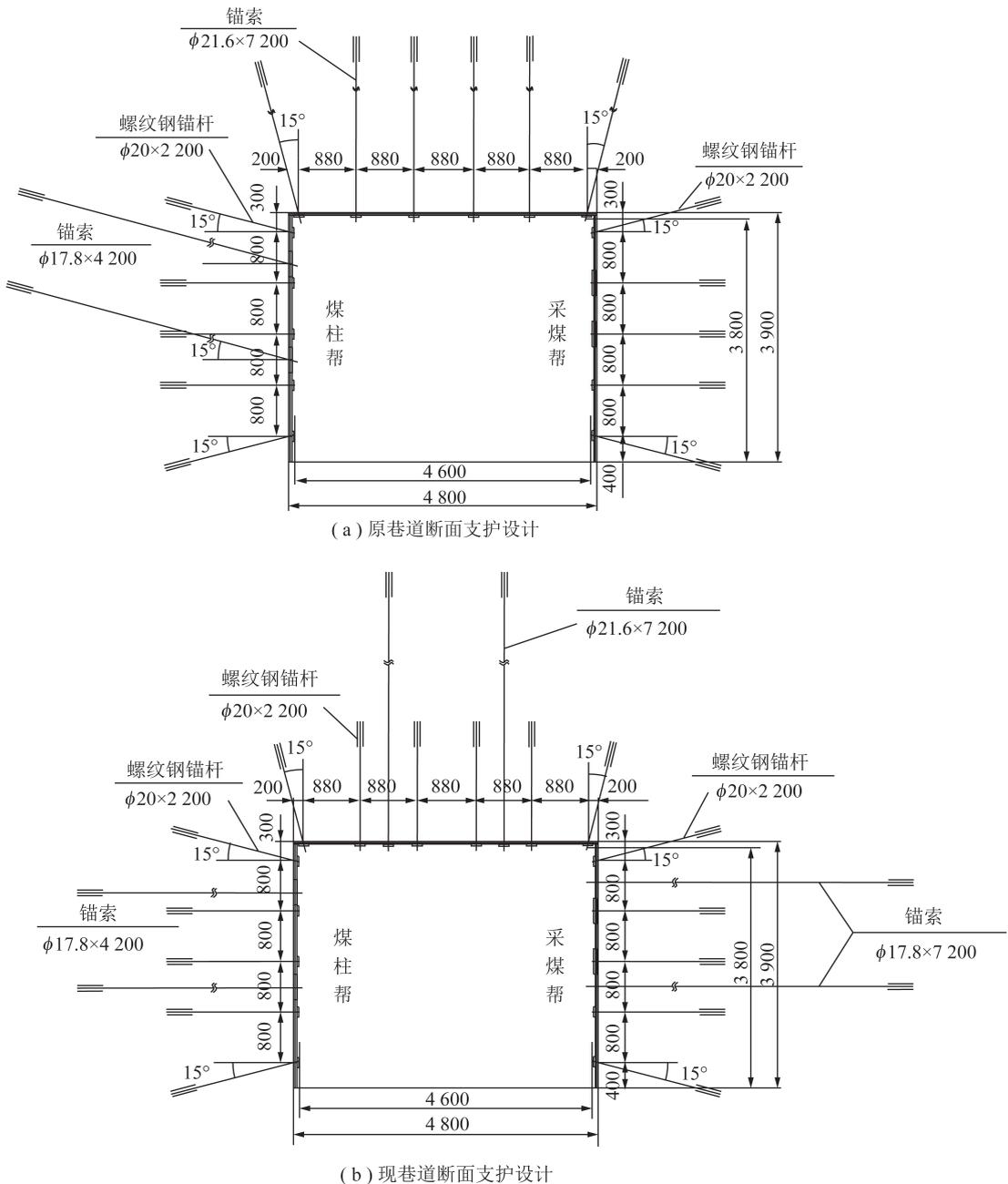


图11 15106回风巷支护参数

Fig.11 Bolt support parameters for return airway 15106 of original roadway section support design and design of current roadway section support

4.2 15106工作面监测测站布置及数据分析

寺家庄矿15106回风巷围岩状态感知监测系统基于多源信息感知的矿用光纤光栅传感成套设备,构建了光纤传感网络及大容量智能感知系统,实现了巷道顶板离层、围岩应力和锚杆应力应变等多参量信息高精度监测及可靠快速传输^[27]。

结合寺家庄矿15106工作面回采巷道、配电室及井下工业以太环网的布置特点,在15106回风巷内布置3个综合测站,如图12所示。第1综合测站距15106回风巷巷口1050 m(位于原巷道支护段范围

内),第2综合测站距15106回风巷巷口1150 m,第3综合测站距15106回风巷巷口1250 m。每个测站的巷道顶板和两帮各布设1根FBG测力锚杆,尺寸为 $\phi 22\text{ mm}\times 2\ 200\text{ mm}$ 。

图13为第3综合测站在30 d观测期内巷道顶板、实体煤帮侧和煤柱帮侧锚杆杆体轴力的监测数据,第3综合测站紧跟巷道掘进工作面安装,在观测期内巷道向前掘进272 m,可完整地呈现出巷道掘进影响期和掘进稳定期内锚杆受力的全过程。

从图13可以得出:顶板锚杆在距巷道周边800~

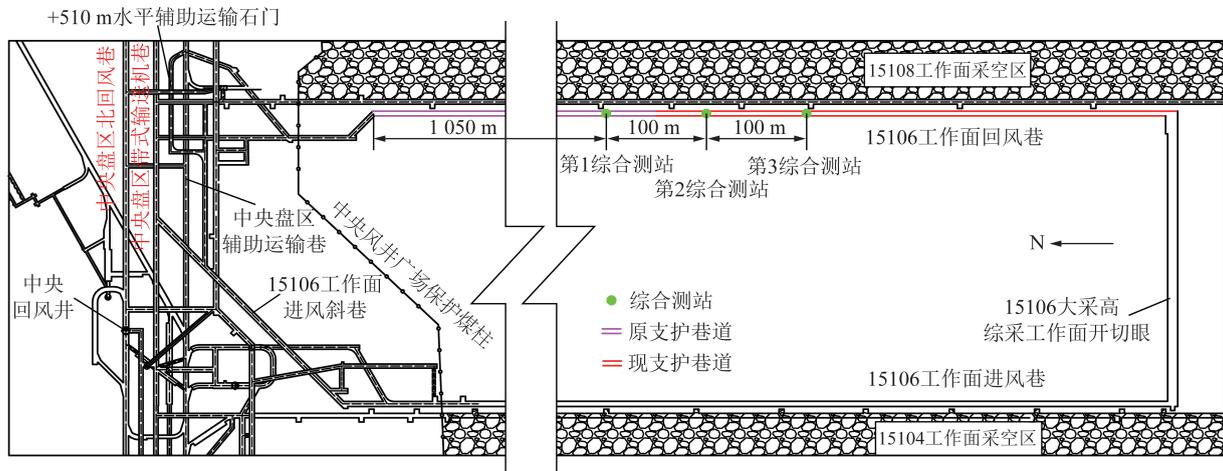


图12 15106工作面及监测测站布置

Fig.12 Arrangement of monitoring station and working face 15106

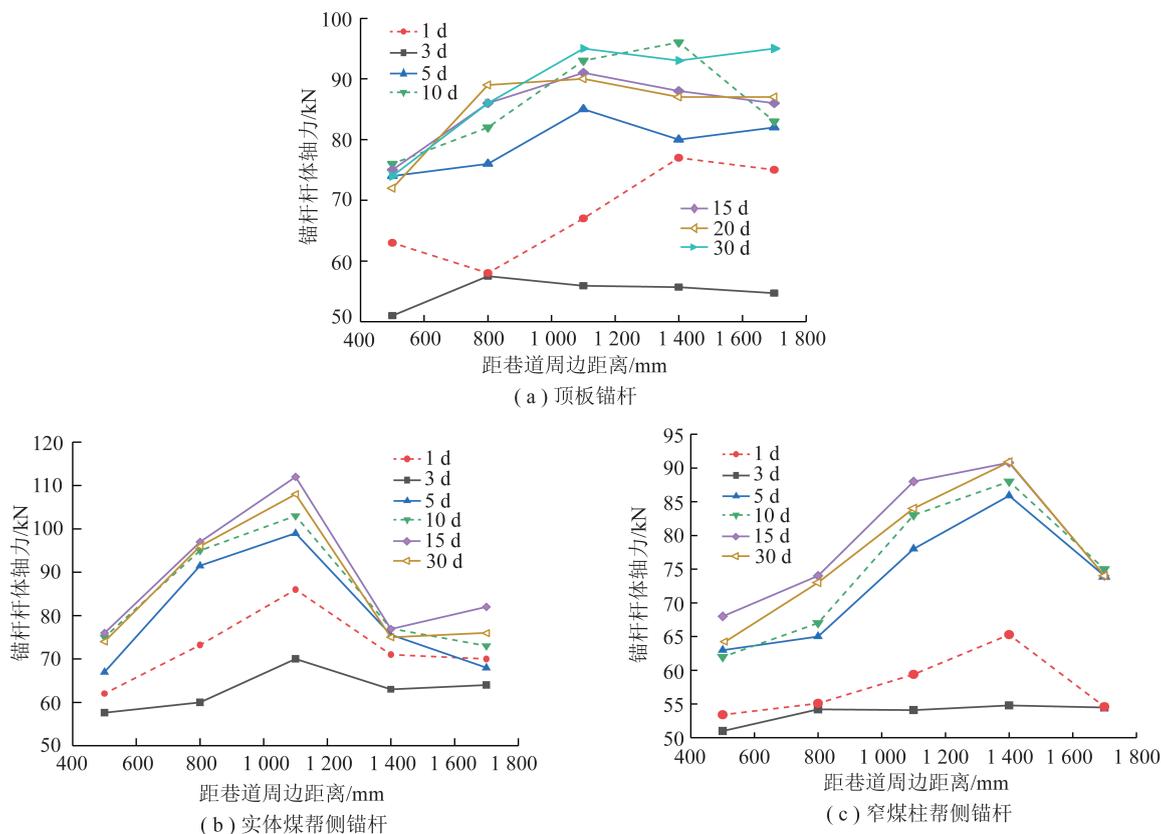


图13 第3综合测站锚杆杆体的轴力监测情况

Fig.13 Force monitoring of bolt body in the third comprehensive measuring station

1 700 mm 内受力较大且均匀,杆体最大轴力为 96 kN,在锚杆安装 5 d 后基本稳定;实体煤帮侧锚杆杆体最大轴力点在距巷道周边 1 100 mm 位置,杆体最大轴力为 113 kN,在锚杆安装 5 d 后基本稳定并有缓慢增长趋势;窄煤柱帮侧锚杆杆体最大轴力点在距巷道 1 400 mm 位置,杆体最大轴力为 91 kN,在锚杆安装 5 d 后基本稳定。分析表明,前 5 d 为该巷道的掘进影响期,5 d 后巷道处于稳定期。

图 14 为第 3 综合测站附近顶板下沉量和两帮位移量的观测数据。顶板下沉量最大为 65 mm,实体煤帮侧位移量最大为 90 mm,窄煤柱帮侧位移量最大为 80 mm,均远小于原支护巷道的变形量(两帮最大移近量达 1 560 mm,顶底板最大相对移近量达 900 mm),证明优化后的巷道支护方案能够有效控制围岩变形,改善锚杆受力状态。

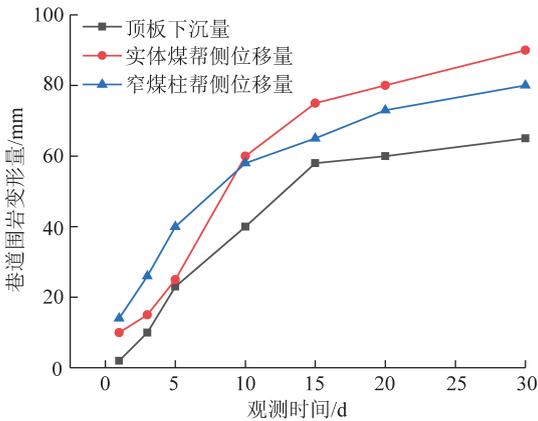


图 14 巷道围岩变形测量曲线

Fig.14 Measurement curves of surrounding rock deformation of roadway

5 结 论

(1)对比分析了基体表面粘贴封装和基体刻槽封装的FBG传感器应变传递公式,得到FBG传感器应变传递受黏结剂剪切模量、凹槽形状和光纤光栅粘贴长度3个因素影响,凹槽形状不仅改变基体的应力平衡状态,还导致黏结剂内部剪切应力不均匀分布,进而影响光纤光栅受力状态。

(2)根据正交试验的极差计算结果,使用AB环氧树脂胶、凹槽形状为半圆形且粘贴长度为100 mm时应变传递效率最大,为最优封装方案;根据方差计算结果,黏结剂的种类对应变传递效率的作用显著,其次为凹槽形状,光纤光栅的粘贴长度对应变传递效率的作用不显著。

(3)建立了寺家庄矿15106回风巷围岩状态感知监测系统,分析了第3综合测站30 d观测期内锚

杆杆体的受力情况,结果表明:顶板锚杆在距巷道周边800~1 700 mm 受力较大且均匀,杆体最大轴力为96 kN;实体煤帮侧锚杆杆体最大轴力点在距巷道周边1 100 mm 位置,杆体最大轴力为113 kN;窄煤柱帮侧锚杆杆体最大轴力点在距巷道1 400 mm 位置,杆体最大轴力为91 kN,前5 d为该巷道的掘进影响期,5 d后巷道处于稳定期。通过光纤光栅矿压在线监测系统,可方便提取井下个测站中每根测力锚杆的监测数据,为分析巷道矿压和评价支护方案提供便利。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1-10.
- [2] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究及探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [3] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术70年及展望[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):1-30.
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1-30.
- [4] 张雷,黄志敏,白龙,等.锚杆锚固缺陷无损检测信号的多尺度熵分析[J].中国矿业大学学报,2021,50(6):1077-1086.
ZHANG Lei, HUANG Zhimin, BAI Long, et al. Multiscale entropy analysis of non-destructive test signals of anchoring defects of rock bolts [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(6): 1077-1086.
- [5] 胡雄武,张平松,程桦,等.井下瞬变电磁法超前探测中锚杆干扰定量评价[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3275-3282.
HU Xiongwu, ZHANG Pingsong, CHENG Hua, et al. Quantitative assessment of interference induced by roof bolt during advanced detection with transient electromagnetic method in mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3275-3282.
- [6] 张拥军,安里千,于广明,等.锚杆支护作用范围的数值模拟和红外探测实验研究[J].中国矿业大学学报,2006,35(4):545-548.
ZHANG Yongjun, AN Liqian, YU Guangming, et al. Numerical simulation and infrared radiation detection experiment for acting area of bolt supporting [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(4): 545-548.
- [7] 吴志刚.电阻应变式测力锚杆载荷下降的原因分析[J].煤炭技术,2009,28(1):100-102.
WU Zhigang. Causes analysis on load reclusion of resistance

- strain dynamometry bolt [J]. *Coal Technology*, 2009, 28(1): 100-102.
- [8] 陈建勋,尹增廉. CD型钢弦式测力锚杆的研制[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2006, 23(9): 45-46.
CHEN Jianxun, YIN Zenglian. Development of CD type vibrating-wire force anchor[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2006, 23(9): 45-46.
- [9] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber wave guide: Application to reflection fiber fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [10] 苑立波,童维军,江山,等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 1-34.
YUAN Libo, TONG Weijun, JIANG Shan, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 1-34.
- [11] 赵燕杰,王昌,刘统玉,等. 基于光谱吸收的光纤甲烷监测系统 在瓦斯抽采中的应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(10): 2857-3074.
ZHAO Yanjie, WANG Chang, LIU Tongyu, et al. Application in methane extraction of fiber methane monitoring system based on spectral absorption [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10): 2857-3074.
- [12] 柴敬. 岩体变形与破坏光纤传感测试基础研究 [D]. 西安:西安科技大学, 2003.
CHAI Jing. Basic study on crack and deflection of rock by optical fiber sensing technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2003.
- [13] 梁敏富,方新秋,柏桦林,等. 温补型光纤光栅压力传感器在锚杆支护质量监测中的应用 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(11): 2826-2833.
LIANG Minfu, FANG Xinqiu, BAI Hualin, et al. Application of temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor for bolting quality monitoring[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(11): 2826-2833.
- [14] 梁敏富,方新秋,陈宁宁,等. 表贴式光纤光栅锚杆应变感知机理与应用研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(6): 1243-1251.
LIANG Minfu, FANG Xinqiu, CHEN Ningning, et al. Strain sensing mechanism of surface bonded fiber Bragg grating bolt and its application [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(6): 1243-1251.
- [15] CHAI J, LIU Q, LIU J X, et al. Assessing the difference in measuring bolt stress: A Comparison of two optical fiber sensing techniques [J]. *Journal of Sensors*, 2018, 56: 1-11.
- [16] WANG P, ZHANG N, KAN J G, et al. Fiber bragg grating monitoring of full-bolt axial force of the bolt in the deep strong mining roadway [J]. *Sensors*, 2020, 20(15): 4242-4235.
- [17] DONG Jianjun, XIE Zhengquan, ZHENG Gaoyang, et al. Monitoring rock bolt safety based on FBG sensors [J]. *AIP Advance*, 2022, 12: 025305.
- [18] ZHAO Yiming, ZHANG Nong, SI Guangyao, et al. Study on the optimal groove shape and glue material for fiber Bragg grating measuring bolts [J]. *Sensors*, 2018, 18: 1799-1808.
- [19] 吴朝霞,吴飞. 光纤传感技术及应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 2011: 31-49.
- [20] 刘鸿文. 材料力学 I [M]. 北京:高等教育出版社, 2017: 1-50.
- [21] COX H L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials [J]. *Brit J Appl Phys*, 1952, 3: 72-78.
- [22] 陈宁宁. 光纤布拉格光栅测力锚杆传感特性与测量误差研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2018.
CHEN Ningning. Study on sensing characteristics and measurement errors of fiber Bragg grating dynamometry bolts [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [23] 魏世明. 岩体变形光纤光栅传感检测的理论与方法研究 [D]. 西安:西安科技大学, 2008.
WEI Shiming. Study on theory and method of fiber Bragg grating sensing in rock deformation test [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [24] 徐仲安,王天保,李常英,等. 正交试验设计法简介 [J]. *科技情报开发与经济*, 2002, 12(5): 148-150.
XU Zhong'an, WANG Tianbao, LI Changying, et al. Brief introduction to the orthogonal test design [J]. *Science/Technology Information Development & Economy*, 2002, 12(5): 148-150.
- [25] 董如何,肖必华,方永水. 正交试验设计的理论分析方法及应用 [J]. *安徽建筑工业学院学报*, 2004, 12(6): 103-106.
DONG Ruhe, XIAO Bihua, FANG Yongshui. The theoretical analysis of orthogonal test designs [J]. *Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry*, 2004, 12(6): 103-106.
- [26] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究 [J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(9): 52-55.
LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. *Experiment Technology and Management*, 2010, 27(9): 52-55.
- [27] 方新秋,梁敏富,李爽,等. 智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 493-508.
FANG Xinqiu, LIANG Minfu, LI Shuang, et al. Key technologies of multi-parameter accurate perception and security decision in intelligent working face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 493-508.