

基于分布式光纤传感技术的轴向载荷作用下锚杆力学特性试验研究

Experimental Study on Mechanical Characteristics of Bolts Under Axial Load
Based on Distributed Fiber Optic Sensing Technology

柏鑑逵, 李传明 (安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:为了探究锚杆在巷道支护过程中的力学特性,本文采用分布式光纤传感技术分别对两根不同直径的锚杆在轴向载荷作用下的力学特性进行监测,并分析了二者在轴向变形过程中的应变规律。结果表明:轴向载荷作用下,直径越大的锚杆在弹性阶段抵抗弹性变形的能力越强;随轴向载荷的增大,锚杆颈缩断裂位置附近的应变增量较其他位置更大;分布式光纤传感技术可以实时监测锚杆在轴向载荷作用下的应力-应变状态,并且可以判断锚杆断裂破坏时颈缩现象产生的具体位置。

关键词:分布式光纤; 锚杆应变; 拉拔试验; 力学特性

中图分类号: TD352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)05-0043-04

Abstract: In order to investigate the mechanical properties of bolts in the process of roadway support, this paper adopts distributed fiber optic sensing technology to monitor the mechanical properties of two bolts of different diameters under the action of axial load respectively, and analyzes the strain law of both of them in the process of axial deformation. The results show that the larger the diameter of the bolt under axial load, the stronger the resistance to elastic deformation at the elastic stage; With the increase of axial load, the strain increment near the neck contraction fracture position of bolt is larger than that at other positions; The distributed optical fiber sensing technology can monitor the stress-strain state of the bolt under axial load in real time, and can judge the specific location of the neck contraction phenomenon when the bolt is broken.

Key words: distributed optical fiber sensor; bolt strain; pull-out test; mechanical characteristics

1 前言

地下开采活动中,锚杆支护是最常见的支护形式,由于锚杆主要安装在围岩内部,其自身的变形以及受力状态难以判断,在危险发生之前难以做出准确预判。因此,对锚杆力学性能的研究显得尤为重要。由于埋入岩层中的锚杆受力状态的复杂性,且在支护过程中与围岩及锚固剂紧密接触,使得锚杆应变的监测非常困难。因此,将分布式光纤传感技术应用到锚杆轴向变形的研究中,为锚杆轴向应变的监测提供新的技术手段。

光纤传感技术是最近几年新发展起来的一门新的技术。随着分布式光纤传感技术的逐渐成熟,其

已经从理论方面的研究转变为工程中的实际应用。许多学者对光纤传感技术在锚杆支护机理等方面进行了大量的研究,为本文的实验研究提供了基础。柴敬^[1]通过对比光纤 Bragg 光栅传感器与电阻应变片两个监测系统的结果,得到了光纤 Bragg 光栅传感器的分辨率与灵敏度优于电阻应变片的结论。林传年等^[2]利用了光纤传感技术对隧道现场的检测,得到了锚杆轴力的变形特征,为光纤传感技术在岩土工程中的应用奠定了基础。柴敬、赵文华等^[3]通过光纤光栅传感技术监测锚杆支护过程中的受力情况,验证了光纤光栅端头式测力计监测结果的准确性。张伟刚等^[4]利用光纤布拉格光栅多点传感网络系统对温度和位移进行了试验研究,验证了其结果与多点传感理论的一致性。李东升等^[5]推导了光纤传感器测量的应变值与实际情况中应变状态的关系,结果表明,需要对光纤传感器测量的应变值进行修正后方能与实际应变状态一致。高翔^[6]研究了轴向拉应力作用下锚杆的变形特点以及应力波的传播特性,揭示了轴向拉应力作用下锚杆的变形特

[作者简介] 柏鑑逵(1998—),男,硕士,从事矿山压力与岩层控制方面研究。

[基金项目] 国家自然科学基金(52174103)

[引用格式] 柏鑑逵,李传明.基于分布式光纤传感技术的轴向载荷作用下锚杆力学特性试验研究[J].中国矿山工程,2023,52(5): 43-46+58.

点以及对应力波在锚杆中传播特性的影响规律,为本文研究锚杆在轴向载荷作用下的力学特性提供了理论基础。高俊启等^[7]对锚索的应力状态进行检测,结果表明分布式光纤传感器测量精度较高,误差较小。

可见,上述研究成果很大程度提高了人们对分布式光纤传感技术的了解,但是对于其在地下煤矿锚杆支护监测方面的研究有待进一步深入。因此,本文通过分布式光纤传感技术对锚杆在轴向载荷作用下的应变特征进行实时监测,并分析试验过程中锚杆的轴向应变规律,为煤矿地下工程安全施工及灾害防治提供理论依据和借鉴。

2 分布式光纤的应变监测原理

本次试验采用表面黏贴的方式利用分布式光纤传感器黏贴在锚杆表面来监测应变传递规律。孙丽等^[8]提出的基片式传感器监测应变与基体结构应变之间的计算规律表明理论推导的准确性,所得出的应力传递方法可广泛应用于实际工作。

本次试验的分布式光纤传感器的结构只包括纤芯与护套层,分布式光纤传感技术的应变感应元件为光纤的纤芯部分,锚杆应变通过剪应力传递至纤芯,对于本次试验锚杆杆体的轴向应变与分布式光纤的轴向应变关系见式(1)~式(3)。

$$\varepsilon_g = \varepsilon_m \alpha(k, L) \quad (1)$$

式中, ε_g 为分布式光纤传感器的轴向应变; ε_m 为锚杆的轴向应变; $\alpha(k, L)$ 表示与光纤传感器黏贴长度有关的应变传递系数。

$$\alpha(k, L) = 1 - \frac{\sin(kL)}{kL \cosh(kL)} \quad (2)$$

式中, L 为光纤传感器的黏贴长度; k 是与光纤和黏结材料特性有关的参数。

$$k^2 = \frac{1}{1 + v_c \frac{E_g r_g^2 \ln \frac{r_c}{r_g}}{E_c r_g^2}} \quad (3)$$

式中, v_c 为黏结材料的泊松比; E_c 为黏结材料的弹性模量; E_g 为光纤的弹性模量; r_g 为光纤的外径; r_c 为黏结材料的外径。

通过以上公式的计算可以得出锚杆的轴向应变 ε_m ,可以通过式(4)进一步计算出锚杆的轴向应力。

$$N_i = \frac{1}{4} \pi D^2 E \varepsilon_i \quad (4)$$

式中, N_i 为锚杆在第*i*点的轴向应力; D 为锚杆直径; E 为锚杆的弹性模量; ε_i 为锚杆在第*i*点处的应

变值。

3 试验方案

3.1 试验测试系统

本次试验系统主要包括锚固拉拔测试系统与光纤监测系统。锚固拉拔测试采用 WJM-6500 型微机静载锚固试验机,将锚杆卧于试验机上,两端分别用夹具固定,具体如图 1 所示。

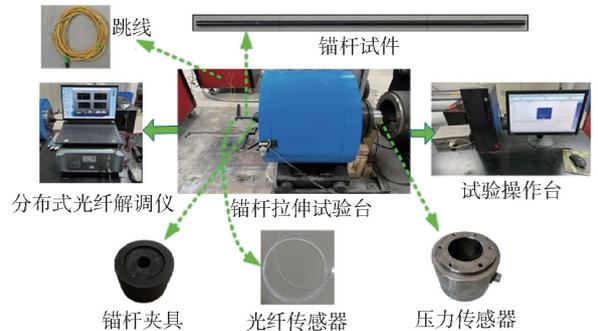


图 1 试验测试系统

光纤监测系统采用高精度分布式光频域应变温度分析仪,可在一根光纤上可同时测量数千万个传感点,在高分辨率、高精度传感领域得到广泛应用。

3.2 试验材料准备

本次试验采取平行试验方法,分别选用规格为 $\phi 22 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}$ 和 $\phi 20 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}$ 的相同材质矿用左旋螺纹钢锚杆。锚杆的具体参数见表 1。光纤传感器选择 0.9 mm 分布式应变光缆。

表 1 锚杆参数

锚杆编号	锚杆型号	锚杆直径/mm	锚杆长度/m
MG1	MG335	22	1.3
MG2		20	1.3

每根锚杆分别在表面黏贴两根分布式光纤传感器,并在夹具需要夹紧的位置刻上长度为 5 cm、深度为 1 mm 的凹槽,以防止锚杆安装夹具后在拉伸过程中将黏贴在锚杆上的分布式光纤传感器夹断,锚杆试件如图 2 所示,光纤传感器如图 3 所示。



图 2 锚杆试件

3.3 试验步骤

试验开始之前,首先在拉拔仪的操控系统内填写试验的具体方案,具体如图 4 所示。预加载指令

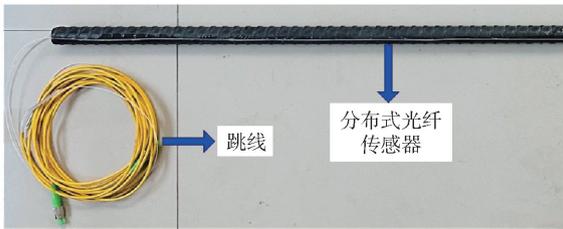


图3 光纤传感器黏贴

的目的是将试件与拉拔测试系统的各部分紧密接触,并且此过程中产生的数据不作为有效数据。在预加载完成后,利用高精度分布式光频域应变温度分析仪对锚杆的应变初始值进行监测并记录。锚杆拉拔测试系统按照设置好的加载速度对锚杆施加轴向载荷,直到锚杆发生断裂破坏,系统会自动判断试验结束。

步骤	控制指令类型	控制通道	控制速率	单位	目标值	单位	到达目标后
1	预加载	位移	3	mm/min	1	kN	等待试验
2	定位移动控制	位移	0.1	kN/sec	400	kN	试验结束

图4 试验指令方案

在整个锚杆拉拔测试的过程中,位移与载荷的数据分别通过位移传感器和压力传感器实时输出到测试系统的显示器。试验加载的过程中,在锚杆达到塑性变形阶段之前,每10 kN测量一次锚杆的应变值。在锚杆的塑性变形阶段结束之后,每5 kN测量一次锚杆的应变值。直至锚杆破坏,测量结束。

4 结果分析

4.1 轴向载荷作用下锚杆的力学特性分析

由静载锚固试验机输出的数据可得锚杆拉拔过程中的位移-载荷特征曲线,两组锚杆的曲线如图5所示。由图可知,锚杆在拉拔过程中,第一阶段(0~a)为弹性阶段,随着轴向荷载的增加,应力-应变成正比关系并逐渐增加,此时如果将轴向载荷卸掉,锚杆将恢复到原有的样子;第二阶段(a~b)为屈服阶段,应力与应变不构成比例关系,锚杆在此阶段发生了不可逆的塑性变形,应变增量大于应力增量;第三阶段(b~c)为强化阶段,锚杆在该阶段的抵抗塑性变形的能力又得到了提高,变形程度加快,c点到达拉拔负荷的最大值;第四阶段(d点以后)为损伤失效阶段,此阶段的锚杆会在轴向载荷的作用下发生断裂破坏。本文主要针对锚杆在发生断裂破坏时的应力-应变状态进行研究。

根据锚杆拉拔过程中的位移-载荷特征曲线可

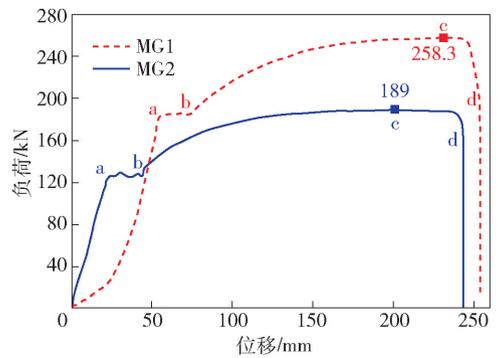


图5 锚杆拉拔位移-负荷曲线图

知,直径越大的锚杆在弹性阶段持续的时间越长,所表现出的抵抗弹性变形的能力越强,并且断裂破坏时的载荷更大。

4.2 轴向载荷作用下锚杆的应变特征分析

受外力作用的物体产生变形的程度叫做应变。应变可以用来反映物体的刚度、强度、稳定性和韧性。根据试验所测得锚杆在拉拔过程中的应变数据,并结合锚杆的破坏变形状态进行分析。根据试验结果可知,MG1在拉拔之后的延伸率为18.9%,MG2在拉拔之后的延伸率为15.8%。

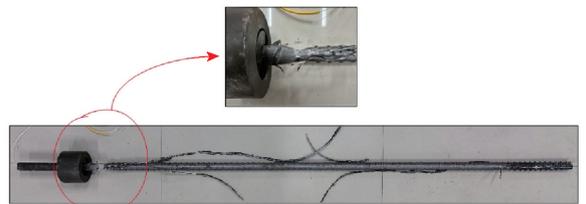


图6 MG1 破坏图

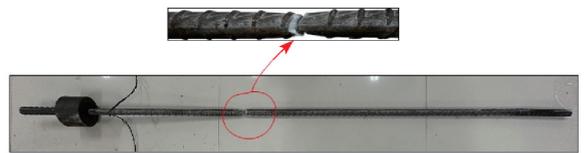


图7 MG2 破坏图

图6、图7所示为锚杆试件断裂之后的破坏状态,可以看出锚杆发生断裂的位置会产生颈缩现象,同时也表明伴随着锚杆颈缩现象的发生,越靠近颈缩断裂位置锚杆的应变增量越明显,并且锚杆在该位置的应变也逐渐达到最大值。MG1和MG2两根锚杆的应变特征如图8、图9所示。

如图8和图9所示,横轴是锚杆延伸后的总长度,横坐标表示锚杆的位置;纵坐标表示锚杆的应变值。图10所示为锚杆颈缩位置关系图,可以看出,随着拉拔载荷的增大锚杆自身的整体应变状态会出现增大的趋势,而在锚杆发生断裂的位置应变值的

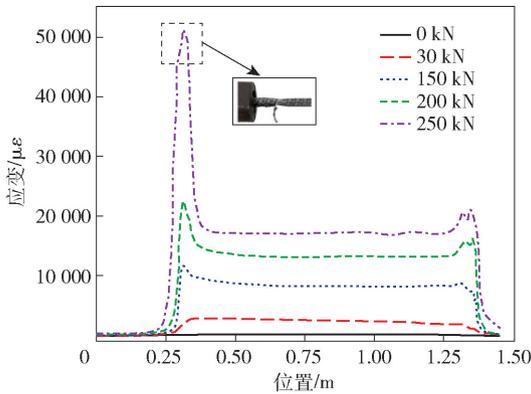


图8 MG1 应变曲线图

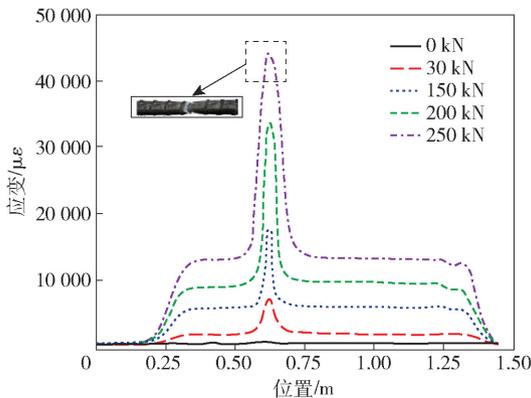


图9 MG2 应变曲线图

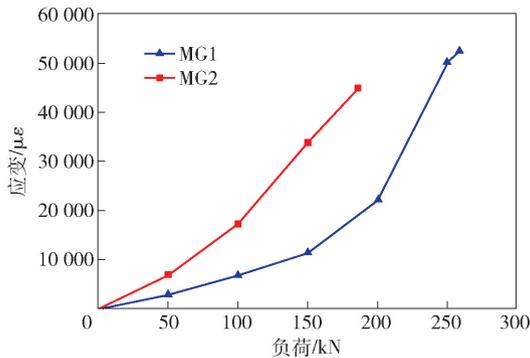


图10 锚杆颈缩位置应变-负荷关系图

增量最大。

MG1 和 MG2 两根锚杆的断裂位置发生在不同的地方,同时表明锚杆颈缩现象发生的位置存在一定的随机性。根据 MG1 的应变曲线图可以看出锚杆左端的应变增量较大,表明其发生断裂破坏的位置大约在距离端口 0.21 ~ 0.42 m,断裂时的最大载荷为 258.3 kN。同时 MG1 在 1.25 ~ 1.36 m 区间内的应变增量也发生了小幅度变化,说明 MG1 在此区间内也发生了一定程度的变形,但是远没达到拉断的程度。同理,根据 MG2 的应变曲线图可以看出在靠近锚杆中间的位置应变增量较大,MG2 发生断裂

破坏的位置大约在距离端口 0.4 ~ 0.7 m 区间内,断裂时的最大载荷为 189 kN。

通过对比两根不同直径的锚杆在轴向拉拔载荷作用下的应变规律,不同之处是直径大的锚杆发生断裂位置的应变值较大;相同点在于两者的应变规律基本一致,且锚杆在两个夹具固定的中间位置的整体应变都有增大的趋势。

5 结论

本文旨在探讨分布式光纤传感技术在锚杆轴向变形中的应用研究。通过分布式光纤传感技术对两根不同直径的锚杆在轴向载荷作用下的变形特征进行实时监测,并结合二者的破坏状态分析了锚杆在轴向变形过程中的应变规律。主要结论如下:

(1) 轴向载荷作用下,锚杆位移-负荷曲线的整体规律基本一致,但直径越大的锚杆在弹性阶段所表现出的抵抗弹性变形的能力越强,并且断裂破坏时的极限载荷更大。

(2) 锚杆随轴向载荷增大应变逐渐增大,锚杆发生断裂前会产生颈缩现象,锚杆颈缩断裂位置附近应变增量较其他位置更大。

(3) 分布式光纤传感技术可以实时监测锚杆在轴向载荷作用下的应力-应变状态,并且可以判断锚杆断裂破坏时颈缩现象产生的具体位置。

[参考文献]

- [1] 柴敬,兰曙光,李继平,等. 光纤 Bragg 光栅锚杆应力应变监测系统[J]. 西安科技大学学报,2005(1):1-4.
- [2] 林传年,刘泉声,高玮,等. 光纤传感技术在锚杆轴力监测中的应用[J]. 岩土力学,2008(11):3161-3164.
- [3] 柴敬,赵文华,李毅,等. 光纤光栅检测的锚杆拉拔实验研究[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(5):719-724.
- [4] 张伟刚,开桂云,董孝义,等. 光纤光栅多点传感的理论实验研究[J]. 光学学报,2004(3):330-336.
- [5] 李东升,李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析[J]. 力学学报,2005(4):435-441.
- [6] 高翔. 轴向拉应力作用下锚杆变形特点及应力波传播特性研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2023.
- [7] 高俊启,施斌,张巍,等. 分布式光纤传感器监测预应力锚索应力状态的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005(S2):5604-5610.
- [8] 孙丽,岳川云,宋岩升. 基片式光纤布拉格光栅传感器应变传递分析[J]. 光电子. 激光,2013,24(5):849-854.

(下转第58页)