

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108415

一种基于阶梯型磁致伸缩复合材料的 聚磁式光纤电流传感器*

许少毅¹, 孙俊雯¹, 彭 强¹, 邢方方²

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221000; 2. 徐州工业职业技术学院 徐州 221140)

摘 要:本文提出了一种基于阶梯型磁致伸缩复合材料的聚磁式光纤电流传感器,解决了常规磁致伸缩复合材料上待测电流诱导磁场“两端高、中间低”的分布问题。首先运用安培环路定律,构建传感器的磁场分布模型,由理论分析可知,材料中心磁场与材料厚度 l_1 、桥面高度 l_2 和桥面长度 h_1 成反比关系;其次,针对传感器的关键参数开展有限元仿真分析,仿真结果表明,材料厚度 l_1 、桥面高度 l_2 和桥面长度 h_1 是材料中心磁场的主要影响因素,磁场会随着材料厚度 l_1 、桥面高度 l_2 和桥面长度 h_1 的增大而减小,与理论分析一致。最后制作材料并开展性能测试,结果表明,随着电流的增大,材料中间位置与两端位置的应变逐渐增大,传感器的线性工作范围为0~1 000 A,灵敏度为0.136 $\mu\text{E}/\text{A}$ 。

关键词: 电流传感器;磁致伸缩复合材料;阶梯型

中图分类号: TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Magnetic focusing optical fiber current sensor based on stepped magnetostrictive composite material

Xu Shaoyi¹, Sun Junwen¹, Peng Qiang¹, Xing Fangfang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China; 2. Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221140, China)

Abstract: In this article, a magnetic-focusing optical fiber current sensor based on the step-type magnetostrictive composite material is proposed, which solves the distribution problem of the current-induced magnetic field high at both ends and low in the middle on the conventional magnetostrictive composite material. Firstly, the magnetic field distribution model of the sensor is formulated by using the Ampere loop law. The theoretical analysis shows that the central magnetic field of the material is inversely proportional to the thickness of the material l_1 , the height of the bridge deck l_2 and the length of the bridge deck h_1 . Secondly, the finite element simulation analysis is implemented for the key parameters of the sensor. Simulation results show that the material thickness l_1 , the bridge deck height l_2 and the bridge deck length h_1 are the main influencing factors of the magnetic field in the center of the material. The magnetic field decreases with the increasing of the material thickness l_1 , the bridge deck height l_2 and the bridge deck length h_1 , which is consistent with the theoretical analysis. Finally, the material is prepared and the performance test is carried out. Results show that with the increasing of current, the strain at the middle and both ends of the material increases gradually. The linear working range of the sensor is 0~1 000 A, and the sensitivity is 0.136 $\mu\text{E}/\text{A}$.

Keywords: current sensor; magnetostrictive composite material; step-type

0 引 言

目前,我国城市轨道交通普遍采用直流牵引供电模

式,牵引电流从变电所流向地铁机车,然后通过走行轨返回变电所,在回流过程中,由于走行轨与大地无法做到完全绝缘,部分牵引电流从走行轨泄漏到周边土壤介质形成杂散电流^[1-2],对混凝土主体结构中的钢筋、埋地金属

收稿日期:2021-08-15 Received Date: 2021-08-15

* 基金项目:国家自然科学基金(52174153,51607178)、中国博士后科学基金特别资助项目(2018T110570)、中国博士后科学基金面上资助项目(2019M652005)、国家轨道交通电气化与自动化工程技术研究中心开放课题(NEEC-2018-B03)、徐州市推动科技创新项目(KC19053)、中国矿业大学英才培育工程专项项目(2021YCPY0109)资助

管道等造成严重的电化学腐蚀;杂散电流还被发现于煤矿辅助运输系统中,存在诱发矿井瓦斯、煤尘爆炸事故等风险^[3];因此,亟需开展杂散电流泄漏监测研究^[4]。

光纤电流传感技术已经被应用于杂散电流泄漏监测^[5],并体现出抗电磁干扰能力强、本征绝缘、频带宽和动态范围大等优点^[6-10]。根据工作原理,光纤电流传感器可以分为法拉第磁光效应式,罗氏线圈光电混合式和磁致伸缩式3类;其中,法拉第磁光效应式光纤电流传感器存在光纤费尔德常数低和双折射较难抑制等问题^[11-13],罗氏线圈光电混合式光纤电流传感器在实际应用中容易受环境温度和电磁场等因素影响,而磁致伸缩式光纤电流传感器是当前电流传感领域的研究热点,利用磁致伸缩材料脆性小、抗拉强度高优点^[14],目前,国内外对这类传感器开展了大量研究。

2010年,熊燕玲等^[15]提出了一种磁路系统,该磁路由硅钢叠片、铁氧体材料、永磁体和磁致伸缩材料组成。与螺线管结构或赫姆霍兹线圈结构相比,该磁路结构更能有效地将磁场引入磁致伸缩材料棒(giant magnetostrictive material, GMM)。

2013年,刘杰等^[16]提出了基于双光纤布拉格光栅的电流互感器,该互感器在磁致伸缩复合材料和蒙乃尔合金材料上分别贴上光纤光栅。贴在磁致伸缩复合材料上的光纤光栅作为传感头,贴在蒙乃尔合金材料上的光纤光栅作为解调原件和温度补偿装置,该互感器同时实现了电流测量和环境温度补偿。

2015年,Nazaré等^[17]提出了用于电力传输线的磁光电流传感器,研究了基于永磁体的直流偏置磁场下磁致伸缩复合材料的最佳线性工作点,实验发现了基于法布里-珀罗可调谐滤波器的光学装置更适用于户外光纤光栅信号解调。

2016年,杨玉强等^[18]提出了温度自动补偿型全光纤交流电流传感器,该传感器将传感光纤和参考光纤贴在磁致伸缩复合材料上并放置在磁路缺口内,传感光纤和参考光纤串联并呈“十字形”,传感光纤与磁场平行,参考光纤与磁场垂直,通过检测两个光纤光栅的反射光强变化实现电流测量并进行温度补偿。

2017年,Han等^[19]提出了一种基于双光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)结构的温度补偿方法,该方法是两个光纤光栅连接在两个相同的磁致伸缩材料上,作者研究了光纤光栅在不同温度和磁场下的传感器性能,同时通过实验表明该方法能降低温度的影响。

2019年,张伟超等^[20]通过电磁场有限元分析方法,对光纤电流传感器导磁磁路进行优化,当导磁回路一端采用四棱台结构,另一端采用圆柱形铁氧体作为引导极与平面导磁回路相连时,穿过磁致伸缩复合材料的整体磁力线比较均匀,磁场最为聚集。

2019年,Dante等^[21]提出了一种基于磁致伸缩材料的环形光纤电流传感器,所提出的传感器由 Terfenol-D 合金、永磁体和导磁体组成,该传感器为开环结构,便于安装在电缆上进行电流监控,同时为了降低传感器的成本,提高传感器的灵敏度,作者将磁致伸缩复合材料缩短至 1 mm,仅使用了 2 g 的铽镓铁合金(Terfenol-D, TD)。

Lopez等^[22]提出了一种基于磁致伸缩复合材料的光纤电流传感器,所提出传感器由磁致伸缩复合材料、永磁体和导磁体组成,为了提高传感器灵敏度,将导磁体设置为由粗到细的环状结构,不仅减少了传感器成本,同时使磁致伸缩复合材料上的磁通密度更为集中,所提出的传感器仅使用 0.42 g TD 合金。

2020年,韩笑笑等^[23]将磁致伸缩复合材料设计为“十字型”材料棒并作为传感头,光纤光栅封装在磁致伸缩复合材料内,封装后与磁场方向平行的光纤光栅对电流和温度敏感,垂直于磁场方向的光纤光栅只对温度敏感,因此该电流传感器可进行温度补偿,并实现电流与温度的同时测量。

在之前的工作中,课题组研究了磁致伸缩复合材料为半圆柱^[24]时传感器的性能,并发现了磁致伸缩复合材料中间位置处磁场强度低于两端位置处磁场强度的问题,通过广泛的文献检索发现,待测电流激发磁场在磁致伸缩复合材料上呈“两端高、中间低”分布的问题在磁致伸缩式光纤电流传感器的现有研究中始终存在。基于此,本文针对磁场分布“两端高、中间低”的关键问题,提出了将传感器中磁致伸缩复合材料设计为阶梯形状,将磁力线集中在磁致伸缩复合材料中心位置,增大粘贴在材料表面的光纤光栅的轴向应变,从而提高光纤电流传感器的灵敏度。本文首先描述光纤电流传感器的设计原理,建立传感器磁场分布的理论模型,分析磁场分布的影响因素;其次,开展有限元仿真,验证理论模型的分析结果;最后,进行材料制备并性能测试,测试结果证明阶梯型磁致伸缩复合材料具有聚磁效果,解决了材料中心位置磁通密度低于两端磁通密度的问题,并测试了传感器的线性工作范围和灵敏度。

1 传感器的设计原理及磁场分布模型

1.1 光纤电流传感器的设计原理

如图1所示为所设计的光纤电流传感器结构示意图,传感器由光纤光栅、磁致伸缩复合材料、导磁体以及永磁体组成,传感器以导磁体构建磁路,汇聚形成环形磁场;导磁体上端缺口长度与下端缺口长度相同,导磁体上端缺口处放置磁致伸缩复合材料,光纤光栅粘贴于磁致伸缩复合材料表面,光纤光栅另一端与光纤光栅解调仪相连接。导磁体下端缺口处放置永磁体,为传感器提供直流偏置磁场。

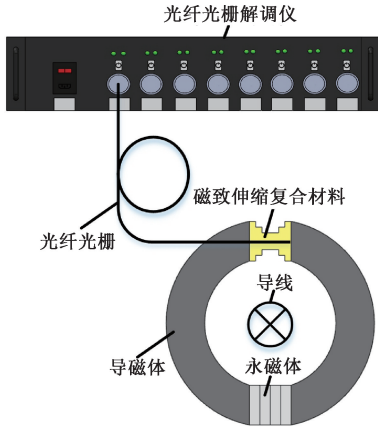


图1 光纤电流传感器结构

Fig. 1 Structure of the optical fiber current sensor

1.2 光纤电流传感器的磁场分布模型

根据图1,解调仪中宽带光源所发出的光从光纤光栅一端入射,光纤光栅看作一个波长宽带反射器,对入射到光栅上的部分光进行反射,其反射形成的中心波长表示为:

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

式中: Λ 为光栅周期, n_{eff} 是光纤光栅的有效折射率, Λ 和 n_{eff} 都为应变的函数。中心波长为 λ_B 的光纤光栅沿轴向应变 ε 与波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 关系为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon \quad (2)$$

式中: P_e 为光纤有效光弹系数,当为硅纤介质时,其值为 $P_e \approx 0.22$ 。

光纤电流传感器的结构参数设定如图2所示,磁致伸缩复合材料为对称结构,其结构参数如图2(a)所示,对其参数将以左半部分进行描述,将左半部分划分为3部分,定义为A、B和C,左半部分总长为 h_3 ,且 h_3 约为5 mm,假设A部分的磁场强度为 H_1 ,长度为 h_1 ,横截面积为 S_1 ;B部分的磁场强度为 H_2 ,长度为 h_2 ,横截面积为 S_2 ;C部分的磁场强度为 H_3 ,长度为 h_2 ,横截面积为 S_3 ;3部分的横截面积尺寸如图2(b)所示。则下列几何关系成立:

$$h_3 = h_1 + 2h_2 \quad (3)$$

$$S_1 = l_1 \times l_2 \quad (4)$$

$$S_2 = l_1 \times \frac{l_2 + l_3}{2} \quad (5)$$

$$S_3 = l_1 \times l_3 \quad (6)$$

式中: l_1 为材料厚度, l_2 为桥面高度(A部分的横截面高度), l_3 为磁致伸缩复合材料的高度(C部分的横截面高度)。

传感器的其他结构参数如图2(c)所示,导磁体的内半径为 r ,外半径为 R ,平均半径为 r_1 ,磁路长度为 l 。导磁体

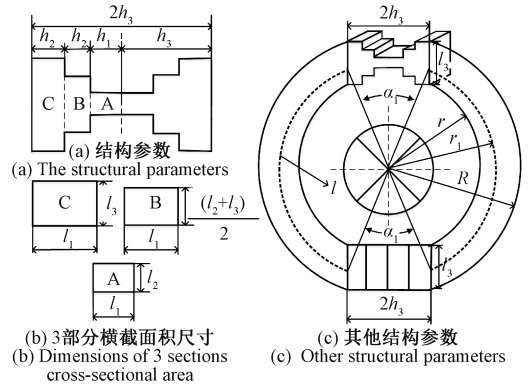


图2 光纤电流传感器的结构参数设定

Fig. 2 Structure parameters design of the optical fiber current sensor

上端缺口长度和下端缺口长度相等,则磁致伸缩复合材料和永磁体相对整个导磁体的角度相同都为 α_1 ,则:

$$\alpha_1 = \arccos \frac{2(r_1)^2 - (2h_3)^2}{2r_1^2} \quad (7)$$

则导磁体的磁路长度 l 为:

$$l = \frac{(180^\circ - \alpha_1) \times \pi \times r_1}{180^\circ} \quad (8)$$

根据导磁体的内半径 r 和外半径 R ,磁致伸缩复合材料的长度 $2h_3$,即可推出导磁体上端缺口的高度(磁致伸缩复合材料的高度) l_3 ,则 l_3 为:

$$l_3 = \sqrt{R^2 - (2h_1 + h_2)^2} - \sqrt{r^2 - (2h_1 + h_2)^2} \quad (9)$$

假设导磁体的磁场强度为 H_4 ,永磁体的磁场强度为 H_5 ,在不考虑漏磁与外界干扰的情况下,根据磁通连续性,当导线流过电流 I 时,导磁体汇聚导线周围的磁场,形成环形磁回路。根据安培环路定律:

$$I = 2[H_1h_1 + H_2h_2 + H_3h_2 + H_4l + H_5h_3] \quad (10)$$

则磁致伸缩复合材料中心位置受导体产生的磁场为:

$$H_1 = \frac{I}{2h_1 + \frac{4l_2h_2}{l_2 + l_3} + \frac{2l_2h_2}{l_3} + \frac{2\mu_1l_1l_2l}{\mu_2 \cdot l_3 \cdot 10} + \frac{2\mu_1l_1l_2h_3}{\mu_3 \cdot l_3 \cdot 10}} \quad (11)$$

式中: μ_1 、 μ_2 、 μ_3 分别代表磁致伸缩复合材料、导磁体和永磁体的相对磁导率。

由于永磁体会对磁致伸缩复合材料产生一个偏置磁场,设永磁体提供的偏置磁场为 H_{br} ,则磁致伸缩复合材料产生的总磁场为:

$$H = H_1 + H_{br} \quad (12)$$

磁致伸缩复合材料受到磁场的影响会被磁化,其内部的磁畴在轴向方向会被拉伸,其拉伸的位移量与磁场之间的关系为:

$$\Delta L = 2kHh_3 \quad (13)$$

式中: k 为磁致伸缩复合材料的磁致伸缩系数, $2h_3$ 是磁致伸缩复合材料的总长度。则粘贴在磁致伸缩复合材料上的光纤光栅产生的应变为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (14)$$

式中: L 为光纤光栅的有效长度,被测电流 I 与光纤光栅中心波长变化的关系为:

$$\Delta\lambda_B = \frac{4n_{eff}\Delta kh_3(1-P_e)H}{L} \quad (15)$$

根据式(15)可得 $\Delta\lambda_B$ 与电流 I 成线性关系,所以通过解调仪获取光纤光栅中心波长的变化,即可得到导线电流值。同时根据式(3)、(8)、(9)、(11)和(15)可知,材料厚度 l_1 、桥面高度 l_2 和桥面长度 h_1 与磁场强度 H_1 与成反比关系,分别减小材料厚度 l_1 、桥面高度 l_2 和桥面长度 h_1 的量值,阶梯型磁致伸缩复合材料中心位置的磁场逐渐增大,实现了中心位置聚磁,可见中心位置聚磁原因主要与材料厚度 l_1 、桥面高度 l_2 和桥面长度 h_1 有关。在此基础上,将针对材料厚度 l_1 、桥面高度 l_2 和桥面长度 h_1 的影响开展有限元仿真,验证理论研究成果。

2 传感器的有限元仿真分析

本文将对传感器进行有限元仿真分析,首先通过SOLIDWORKS软件绘制传感器三维模型,如图3(a)所示,其中导磁体上端缺口与下端缺口的长度设置为10 mm,导磁体外径为25 mm,内径为15.7 mm,厚度为10 mm;其次将三维模型导入到COMSOL软件中并从材料库中选择铜、铁和空气作为导线、导磁体和空气域的材料,磁致伸缩复合材料的相对磁导率为5,永磁体的相对磁导率为1.06;然后在COMSOL物理场中选择磁场模块,磁场模块中添加外部电流密度作为导线上的被测电流 I ,方向为 Z 轴正方向;最后在COMSOL网格设置中,选择物理场控制网格,网格划分结果如图3(b)所示,网格划分之后选择磁场模块下的稳态求解器进行后处理计算,模拟不同电流情况下传感器的磁通密度,如图3(c)所示。

在保证温度和偏置磁场不变的情况下,通过仿真被测电流分别为200、400、600和800 A时,改变材料厚度 l_1 、桥面高度 l_2 和桥面长度 h_1 对磁致伸缩复合材料的聚磁影响。

2.1 材料厚度(l_1)

考虑到导磁体的厚度为10 mm,所以磁致伸缩复合材料厚度 l_1 的取值范围为0~10 mm,更改材料厚度尺寸,设置材料厚度 l_1 为1、2、4、6、8和10 mm,仿真结果如图4(a)~(d)所示。从图中可以看出,磁致伸缩复合材料中间位置磁场随着材料厚度 l_1 的增大而逐渐减小,仿真结果与理论分析一致。

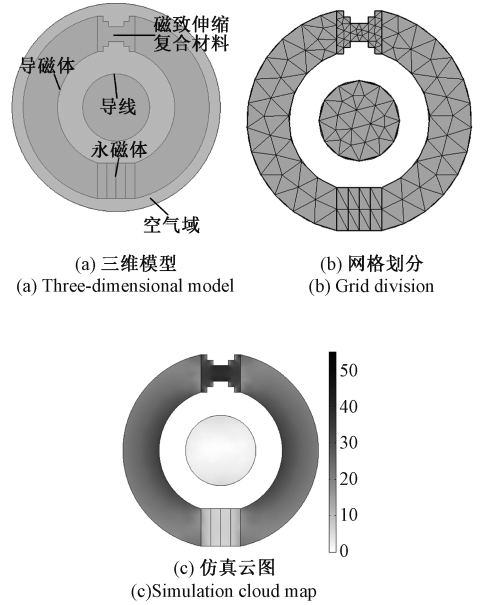


图3 有限元仿真过程

Fig. 3 Finite element simulation process

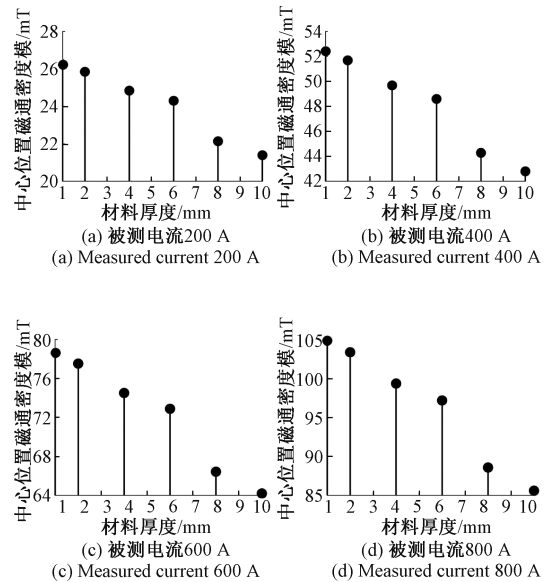


图4 不同被测电流下材料厚度 l_1 与中心位置磁通密度模关系

Fig. 4 Relationship between material thickness l_1 and magnetic flux density modulus at the center under different measured currents

2.2 桥面高度(l_2)

根据导磁体内径15.7 mm、外径25 mm,计算得到导磁体缺口的高度约为9.6 mm。在保持阶梯型磁致伸缩复合材料其他尺寸不变的情况下更改桥面高度,设置桥面高度 l_2 为3、3.5、4、4.5、5、5.5和6 mm,仿真结果如图5(a)~(d)所示。从图中可以看出,磁致伸缩复合材料中间位置磁场随着桥面高度 l_2 的增大而逐渐减小,仿真结果与理论分析一致。

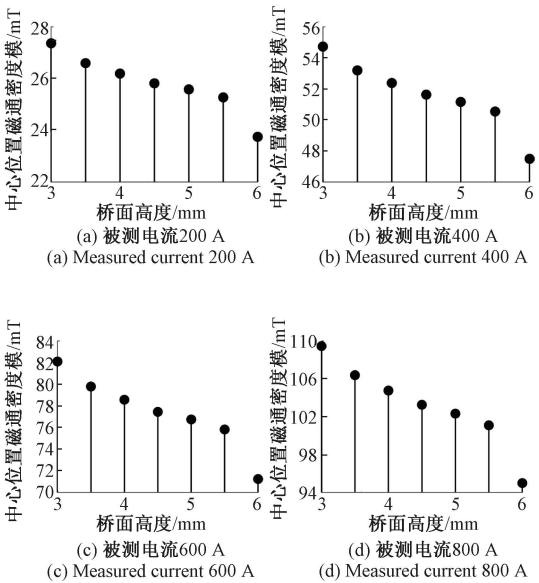


图 5 不同被测电流下桥面高度 l_2 与中心位置磁通密度模关系
Fig. 5 Relationship between the height l_2 of bridge deck and the magnetic flux density modulus at the center under different measured currents

2.3 桥面长度 (h_1)

考虑到导磁体上端缺口为 10 mm,同时保持磁致伸缩复合材料为阶梯型,因此在保持其他尺寸不变的情况下,只更改桥面长度,设置桥面长度 h_1 为 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4 mm,仿真结果如图 6(a)~(d) 所示。从图中可以看出,磁致伸缩复合材料中间位置磁场与材料长度 h_1

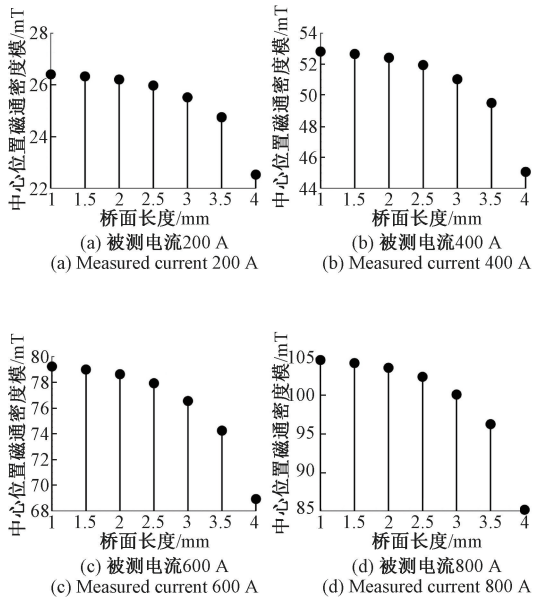


图 6 不同被测电流下桥面长度 h_1 与中心位置磁通密度模关系
Fig. 6 Relationship between the length h_1 of bridge deck and the magnetic flux density modulus at the center under different measured currents

成反比,磁场随着材料长度 h_1 的增大而逐渐减小,仿真结果与理论分析一致。

根据图 4~6,为使传感器的聚磁效果达到最佳且考虑课题组的实际材料制备水平,最终所构建的传感器设计为材料厚度 l_1 取 1 mm,桥面高度 l_2 取 4 mm 以及桥面长度 h_1 取 2 mm。根据所取参数,当待测电流分别为 200、400、600 和 800 A 时传感器的磁通密度如图 7 所示。图中颜色越深表示大量磁力线聚集,磁通密度高,颜色越浅表示少量磁力线聚集,磁通密度弱。通过分析图 7 所示的有限元模拟结果,可以发现阶梯型磁致伸缩复合材料中间位置处所受的磁通密度高于两端磁通密度。

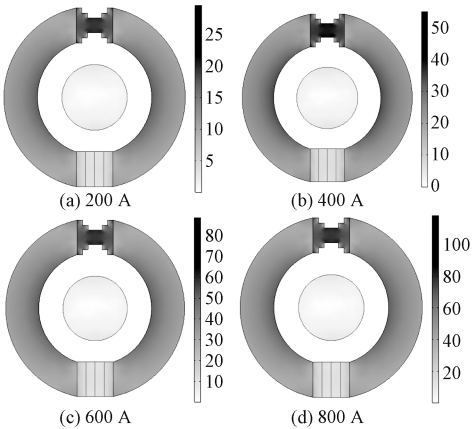


图 7 光纤电流传感器有限元模拟结果
Fig. 7 Finite element simulation results of the optical fiber current sensor

为了进一步量化阶梯型磁致伸缩复合材料的磁通密度分布情况,在材料中心轴线上设置三维截线。当电流为 200、400、600、800 A 时量化后的磁通密度分布情况,如图 8 所示。从图中可以明显看出,当电流为 200 A 时,阶梯型磁致伸缩复合材料中间位置的磁通密度约为 26.2 mT,两端的磁通密度都低于 24 mT;当电流为 400 A 时,阶梯型磁致伸缩复合材料中间位置的磁通密度约为 52.5 mT,两端的磁通密度都低于 48 mT;当电流为 600 A 时,阶梯型磁致伸缩复合材料中间位置的磁通密度约为 78.5 mT,两端的磁通密度都低于 72 mT;当电流为 800 A 时,阶梯型磁致伸缩复合材料中间位置的磁通密度约为 105 mT,两端的磁通密度都低于 96 mT。这 4 组数据表明阶梯型磁致伸缩复合材料具有聚集磁场的作用,将磁场聚集在材料的中间位置。

3 阶梯型磁致伸缩复合材料制作

阶梯型磁致伸缩复合材料制作分为两个步骤,如图 9 所示:1) 阶梯型硅胶模具制作:首先将 A 胶和 B 胶

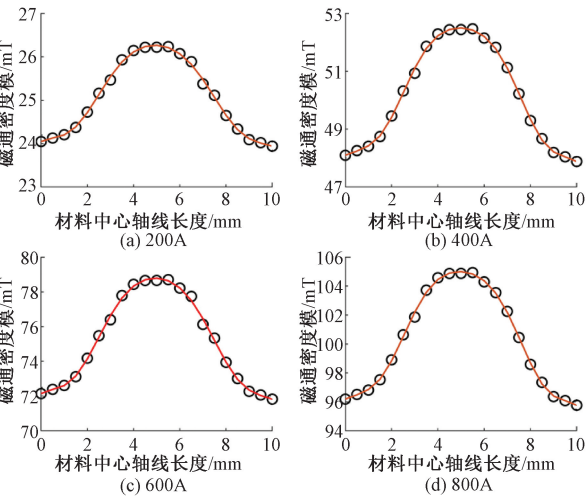


图 8 不同电流下材料中心轴线的磁场分布

Fig. 8 Quantification results of magnetostrictive composites under different currents

按 1:1 比例倒入容器中,然后用搅拌棒充分搅拌,接着将搅拌好的混合物倒入 3D 打印的模型中,在室温下固化一段时间,最后脱模得到硅胶模具;2) 阶梯型磁致伸缩复合材料的制作:首先,依次将环氧树脂、固化剂和磁致伸缩粉末倒入烧杯中,环氧树脂与固化剂按质量比为 3:1,磁致伸缩粉末与环氧树脂的质量比为 6:1,然后用聚四氟乙烯棒将混合物搅拌均匀,并将混合物倒入阶梯型硅胶模具中,接着在阶梯型硅胶模具的两侧长端处放置永磁体,防止颗粒沉降,最后脱模得到阶梯型磁致伸缩复合材料。

4 实验测试

传感器实物结构如图 10(a) 所示,其由磁致伸缩复合材料、导磁体、永磁体以及三维打印(three dimensional printing, 3D) 支架组成。本文采用电阻应变片替代光纤

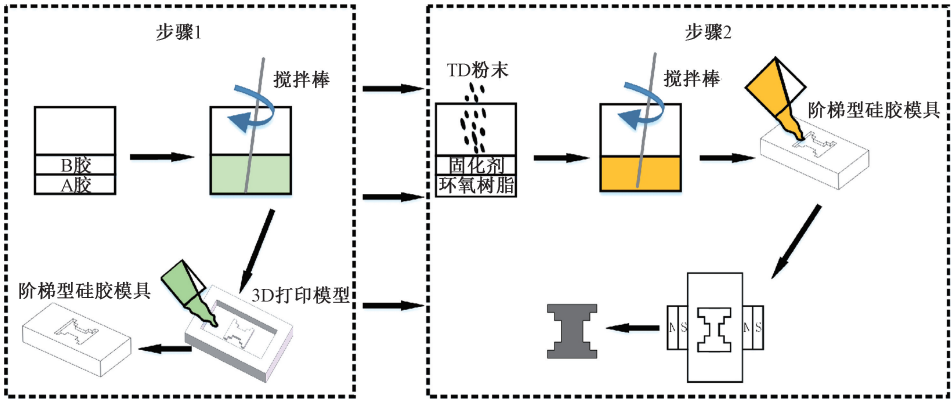


图 9 阶梯型磁致伸缩复合材料制作过程

Fig. 9 Manufacture of magnetostrictive composite material

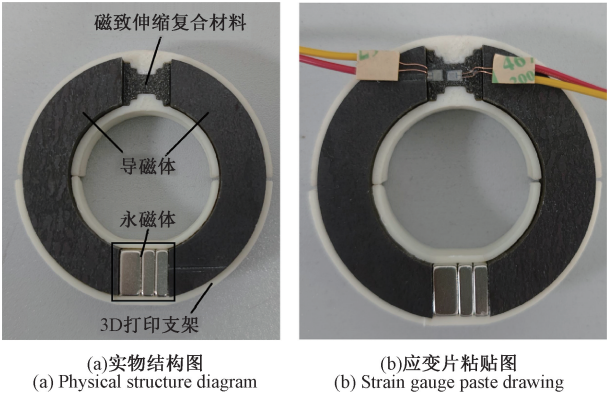


图 10 传感器实物图

Fig. 10 Sensor physical map

问题。首先将电阻应变片分别贴在材料中间位置和左侧位置,如图 10(b) 所示,其次以电阻应变片为传感元件,把待测电流诱导的材料应变转变为应变片的电阻变化,然后通过电阻应变仪测出应变片电阻变化,最后直接转换为待测电流诱导的材料应变。

传感器的测试装置如图 11 所示,该测试装置由大电流发生器、钳形电流表、导线、电阻应变仪以及计算机组成,其中,钳形电流表监测导线中的实际电流值。传感器在直流电流(direct current, DC)0~1 000 A 范围内进行测试,同步观察阶梯型磁致伸缩复合材料中间位置与两端位置的应变。

在测试条件相同的情况下对传感器进行了重复性试验,当应变片贴在材料中间位置处,传感器输出应变数据如表 1 所示,当应变片贴在材料两端位置处,传感器输出应变数据如表 2 所示,传感器 3 次输出的应变与电流之间的关系如图 12 所示。由表 1、2 和图 12(a)~(c) 可

光栅进行测试实验,证明阶梯型磁致伸缩复合材料能解决常规磁致伸缩复合材料磁场“两端高、中间低”分布的

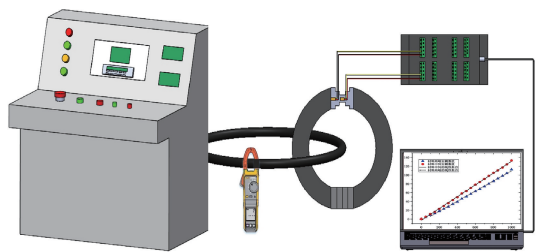


图 11 传感器测试装置
Fig. 11 Sensor testing device

知,随着电流的逐渐增大,阶梯型磁致伸缩复合材料的中间应变与两端的应变差值逐渐增大,说明了阶梯型磁致伸缩复合材料具有聚磁作用,解决了常规磁致伸缩复合材料中心位置磁通密度低于两端磁通密度的问题。

表 1 传感器 3 次实验测试数据 (材料中间位置)
Table 1 Test data of the sensor in three experiments
(middle position of material)

电流/A	0	50	100	150	200	250	300
应变 / $\mu\varepsilon$	1	0	5	11.0	16.0	23.0	36.0
	2	0	6	11.5	17.5	25.0	31.5
	3	0	5	11.0	16.5	24.5	30.0
电流/A	350	400	450	500	550	600	650
应变 / $\mu\varepsilon$	1	43.0	49.5	58.0	63.5	70.5	84.0
	2	44.5	52.0	59.0	65.0	72.5	86.5
	3	44.5	51.0	58.5	65.5	72.0	86.0
电流/A	700	750	800	850	900	950	1 000
应变 / $\mu\varepsilon$	1	91	98.0	105	110.5	117.0	133
	2	93	100.5	108	114.5	122.0	136
	3	92	100.5	108	113.0	121.5	136

表 2 传感器 3 次实验测试数据 (材料两端位置)
Table 2 Test data of sensor in three experiments
(position of both ends of material)

电流/A	0	50	100	150	200	250	300
应变 / $\mu\varepsilon$	1	0	4.5	9.0	13	18.0	23
	2	0	4.0	8.5	13	18.5	23.5
	3	0	4.0	8.0	13	19.0	24.0
电流/A	350	400	450	500	550	600	650
应变 / $\mu\varepsilon$	1	34.0	39.0	46.0	51.0	57	63
	2	34.5	40.0	46.0	51.5	58	63
	3	35.0	40.0	46.5	52.5	59	65
电流/A	700	750	800	850	900	950	1 000
应变 / $\mu\varepsilon$	1	74	80.0	86.0	92.0	98.0	104
	2	75	81.5	87.5	93.5	100.0	106
	3	76	83.0	89.0	94.0	101.5	108

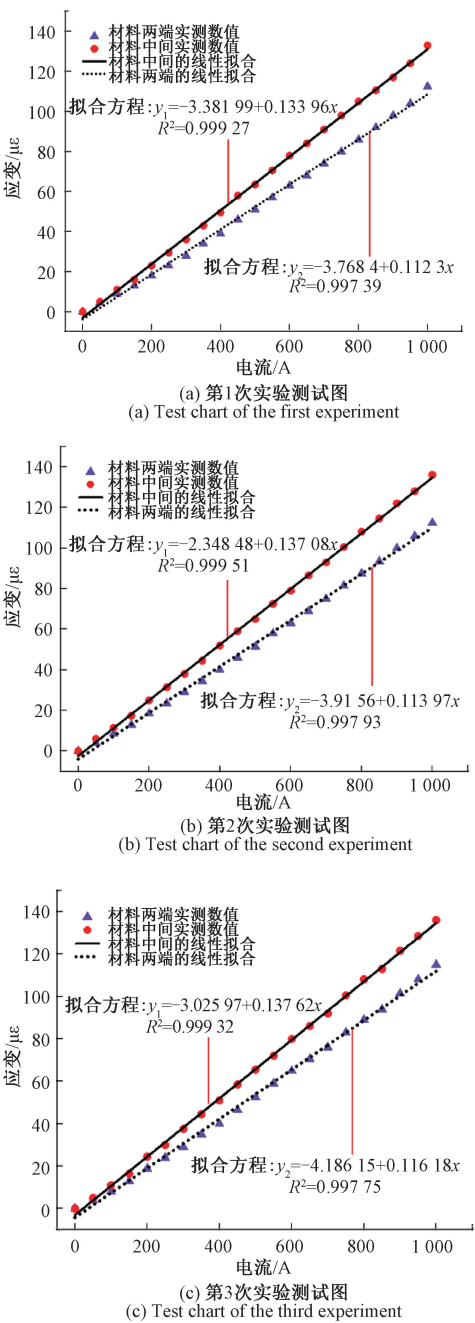


图 12 传感器 3 次输出的应变与电流之间的关系图
Fig. 12 Relationship between strain and current output
by sensor three times

本文测试了传感器灵敏度,应变片贴在材料中间位置和两端位置时,传感器平均输出数据分别如表 3 和 4 所示,传感器平均输出应变与电流之间的关系如图 13 所示。当应变片贴在材料中间时,传感器平均输出应变与电流之间的关系如图 13(a) 所示,从图中可以看出当电流从 0 增大到 1 000 A 时,电阻应变片的应变量为 0 变化到 135 $\mu\varepsilon$,传感器平均输出应变与电流具有良好的线性关系,线性度为 0.999 43,线性工作范围为 0~1 000 A,灵

敏度为 $0.136\text{ }\mu\text{ε/A}$ 。当应变片贴在材料两端时,传感器平均输出应变与电流之间的关系如图 13(b) 所示,从图中可以看出当电流从 100 A 增大到 950 A 时,应变量从 $8.5\text{ }\mu\text{ε}$ 变化到 $106\text{ }\mu\text{ε}$,传感器平均输出应变与电流也具有良好的线性关系,线性度为 $0.999\text{ }06$,线性工作范围较小,约为 $100\sim 950\text{ A}$,灵敏度也较小,约为 $0.116\text{ }\mu\text{ε/A}$ 。

表 3 传感器平均输出应变与电流之间的关系(材料中间)

Table 3 Relationship between average output strain of sensor and current (material middle)					
电流/A	应变/ $\mu\text{ε}$	电流/A	应变/ $\mu\text{ε}$	电流/A	应变/ $\mu\text{ε}$
0	0	350	44.0	700	92.0
50	5.3	400	50.8	750	99.7
100	11.2	450	58.5	800	107.0
150	16.7	500	64.7	850	112.7
200	24.2	550	71.7	900	120.2
250	30.3	600	79.0	950	126.8
300	37.2	650	84.8	1 000	135.0

表 4 传感器平均输出应变与电流之间的关系(材料两端)

Table 4 Relationship between average output strain of sensor and current (material ends)					
电流/A	应变/ $\mu\text{ε}$	电流/A	应变/ $\mu\text{ε}$	电流/A	应变/ $\mu\text{ε}$
0	0	350	34.5	700	75.0
50	4.2	400	39.7	750	81.5
100	8.5	450	46.2	800	87.5
150	13.0	500	51.7	850	93.2
200	18.5	550	58.0	900	99.8
250	23.5	600	64.3	950	106.0
300	28.7	650	69.2	1 000	113.3

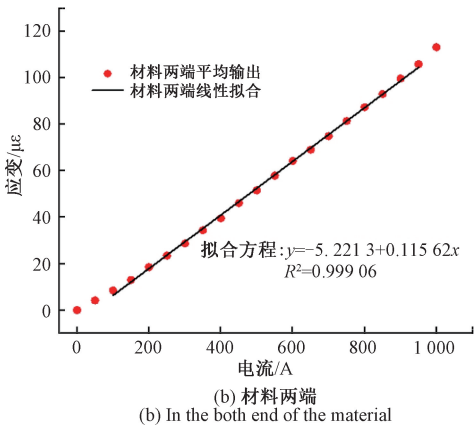


图 13 传感器平均输出应变与电流关系图
Fig. 13 Relationship between average output strain and current of the sensor

5 结 论

本文提出了一种基于阶梯型磁致伸缩复合材料的聚磁式光纤电流传感器,首先设计了传感器结构,构建了传感器的磁场分布模型,同时开展有限元仿真分析并实验验证。实验结果表明:阶梯型磁致伸缩复合材料具有聚磁效果,能将磁场聚集在磁致伸缩复合材料的中间位置处,当电流逐渐增大时,材料中间与材料两端的应变差值增大;粘贴在材料中间位置时传感器的线性范围为 $0\sim 1\text{ }000\text{ A}$,灵敏度为 $0.136\text{ }\mu\text{ε/A}$,粘贴在材料两端处时传感器的线性范围为 $100\sim 950\text{ A}$,灵敏度为 $0.116\text{ }\mu\text{ε/A}$ 。下一步工作将把本文所研制的传感器用于地铁机车走行轨和煤矿电机车轨道等牵引电流的分布式测量,分段监测牵引电流变化规律,实现轨道对地绝缘薄弱位置的定位和维护,对城市轨道交通运营和煤矿安全稳定高效生产具有重要的意义。

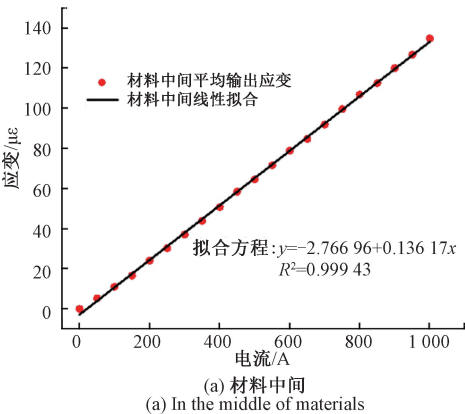
参考文献

[1] XU S Y, LI W, WANG Y Q. Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(8) : 3569-3580.

[2] LEE C H, LU C J. Assessment of grounding schemes on rail potential and stray currents in a DC transit system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4) : 1941-1947.

[3] 庞丹,耿蒲龙,田慕琴,等. 矿用橡套屏蔽电缆绝缘不平衡对杂散电流分布的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6) : 1614-1619.

PANG D, GENG P L, TIAN M Q, et al. Influence of



- the unbalanced insulation of the mining rubber-sheathed shielded cable on stray current distribution[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1614-1619.
- [4] OGUNSOLA A, MARISCOTTI A, SANDROLINI L. Estimation of stray current from a DC-electrified railway and impressed potential on a buried pipe[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2238-2246.
- [5] 李威, 蔡文娟, 王禹桥, 等. 基于光纤传感的地铁杂散电流监测方法[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 848-853.
- LI W, CAI W J, WANG Y Q, et al. Metro stray current detection method based on optical fiber sensing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 848-853.
- [6] 向洋, 孙世政, 党晓圆, 等. 基于光纤布拉格光栅的流量温度复合传感研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 15-22.
- XIANG Y, SUN SH ZH, DANG X Y, et al. Research on compound sensing of flow and temperature based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 15-22.
- [7] 洪成雨, 鲍成志, 武亚军, 等. 增材制造制备性能可控的 FBG 压力传感器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 30-38.
- HONG CH Y, BAO CH ZH, WU Y J, et al. Research on FBG pressure sensor with controllable performance manufactured by additive[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 30-38.
- [8] 孙世政, 廖超, 李洁, 等. 基于光纤布拉格光栅的二维力传感器设计及实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 1-9.
- SUN SH ZH, LIAO CH, LI J, et al. Design and experimental study of two-dimensional force sensor based on fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 1-9.
- [9] 江舒, 李涛, 林杰俊, 等. 船用光纤光栅应变传感器开发与应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 35-42.
- JIANG SH, LI T, LIN J J, et al. Development and application of marine fiber Bragg grating strain sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 35-42.
- [10] 高明, 赵振刚, 李英娜, 等. 基于光纤传感的输电线路杆塔倾斜监测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 51-59.
- GAO M, ZHAO ZH G, LI Y N, et al. Research on tilt monitoring of transmission line tower based on optical fiber sensing[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12): 51-59.
- [11] 王立辉, 杨志新, 殷明慧, 等. 数字闭环光纤电流互感器动态特性仿真与测试[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1890-1895.
- WANG L H, YANG ZH X, YIN M H, et al. Simulation and test of dynamic performances of digital closed loop fiber optic current transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1890-1895.
- [12] ZHANG C X, LI C S, WANG X X, et al. Design principle for sensing coil of fiber optic current sensor based on geometric rotation effect[J]. Applied Optics, 2012, 51(18): 3977-3988.
- [13] OH M C, CHU W S, KIM K J, et al. Polymer waveguide integrated-optic current transducers[J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9392-9400.
- [14] 薛丰, 王博文, 赵智忠, 等. 磁致伸缩触觉传感器的传感模型与特性[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 103-110.
- XUE F, WANG B W, ZHAO ZH ZH, et al. Sensing model and characteristics of magnetostrictive tactile sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 103-110.
- [15] 熊燕玲, 赵洪, 张剑, 等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 949-953.
- XIONG Y L, ZHAO H, ZHANG J, et al. Research on optical current transformer based on fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 949-953.
- [16] 刘杰, 于效宇, 郭文敏, 等. 基于双光纤布拉格光栅结构的电流互感器设计[J]. 半导体光电, 2013, 34(2): 330-333.
- LIU J, YU X Y, GUO W M, et al. Design of current transformer based on double fiber Bragg grating structure[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(2): 330-333.
- [17] DE NAZARÉ F V B, WERNECK M M. Compact optomagnetic Bragg-grating-based current sensor for transmission lines[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(1): 100-109.
- [18] 杨玉强, 杨群, 葛伟, 等. 温度自动补偿超磁致伸缩材料布拉格光栅光纤电流传感器[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2377-2383.

YANG Y Q, YANG Q, GE W, et al. Temperature automatic compensation giant magnetostrictive material Bragg grating optical fiber current sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 2377-2383.

[19] HAN J H, HU H F, WANG H, et al. Temperature-compensated magnetostrictive current sensor based on the configuration of dual fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(22): 4910-4915.

[20] 张伟超, 来永宝, 赵洪, 等. GMM-FBG 光纤电流传感器结构优化及温补模型[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(6): 104-111.

ZHANG W CH, LAI Y B, ZHAO H, et al. Structure optimization and temperature compensation model of GMM-FBG optical fiber current sensor [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(6): 104-111.

[21] DANTE A, LOPEZ J D, CARVALHO C C, et al. A compact FBG-based magnetostrictive optical current sensor with reduced mass of terfenol-D [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31 (17): 1461-1464.

[22] LOPEZ J D, DANTE A, CREMONEZI A O, et al. Fiber-optic current sensor based on FBG and terfenol-D with magnetic flux concentration for enhanced sensitivity and linearity[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(7): 3572-3578.

[23] 韩笑笑, 荆雅洁, 杨濠琨, 等. GMM-FBG 光纤电流传感器温度补偿研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(8): 787-793.

HAN X X, JING Y J, YANG H K, et al. Research on temperature compensation of GMM-FBG optical fiber current sensor [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2020, 31(8): 787-793.

[24] XU S Y, PENG Q, XING F F, et al. A low-cost current sensor based on semi-cylindrical magnetostrictive composite[J]. Electronics, 2020, 9(11): 1833-1845.

作者简介



许少毅(通信作者),2010 年于中国矿业大学获得学士学位,2015 年于中国矿业大学获得博士学位,现为中国矿业大学副教授,主要研究方向为光纤传感与测量、采掘装备智能化。
E-mail: shaoyi@cumt.edu.cn

Xu Shaoyi (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology in 2010 and 2015, respectively. He is currently an associate professor at China University of Mining and Technology. His main research interests include optical fiber sensor and intelligent mining equipment.



孙俊雯,2020 年于衢州学院获得学士学位,现为中国矿业大学硕士研究生,主要研究方向为光纤传感与测量。
E-mail: TS20050155P31@cumt.edu.cn



彭强,2019 年于江苏海洋大学获得学士学位,现为中国矿业大学硕士研究生,主要研究方向为光纤传感与测量。
E-mail: TS19050139P31@cumt.edu.cn



邢方方,2013 年于中国矿业大学获得硕士学位,现为徐州工业职业技术学院讲师,主要研究方向为光纤传感与测量。
E-mail: cumtxingfangfang@163.com

Xing Fangfang received her M. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2013. She is currently a lecturer at Xuzhou College of Industrial Technology. Her main research interest is optical fiber sensor.