

基于 OFDR 技术的工字钢焊接残余应变监测试验

丁家富,王大鹏*

(苏州科技大学 土木工程学院,江苏 苏州 215011)

摘要:针对钢结构焊接所产生的残余应变从理论上难以准确计算的问题,基于光频域反射计(OFDR)技术进行了光纤标定试验和工字钢焊接试验,研究了该技术在钢结构焊接残余应变监测上的应用。试验与分析结果表明:OFDR 技术可以对焊接残余应变实现准确监测,对应变发生位置可以精确定位。

关键词:光频域反射计;分布式监测;瑞利散射;残余应变;模型试验

中图分类号:TN247;TG441.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)03-0052-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Residual strain monitoring test of I-beam welding based on OFDR technology

DING Jiafu, WANG Dapeng*

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu 215011, China)

Abstract: Aiming at the problem that the residual strain caused by steel structure welding is difficult to calculate accurately theoretically, optical fiber calibration test and I-steel welding test are carried out based on optical frequency domain reflectometer (OFDR) technology, and the application of this technology in steel structure welding residual strain monitoring is studied. The test and analysis results show that OFDR technology can accurately monitor the welding residual strain and the location of strain can be precisely located.

Key words: optical frequency domain reflectometry, distributed monitoring, Rayleigh scattering, residual strain, model test

0 引言

钢材作为一种建筑材料,具有自重轻、耐久性好、抗震性好和跨越能力强等优点,已被广泛应用于房建与桥梁建设中。钢结构的应用涉及连接问题,常见的连接形式以焊接为主。其中,中小型钢结构桥梁的焊接质量问题尤为突出,40%脆断事故是从焊缝缺陷处开始的,造成了严重的安全隐患。因此,对焊接残余应变的监测显得极为重要。常见的焊接残余应变的检测方法分为有损检测(盲孔法、取条法)和无损检测(X射线衍射、磁测法等),各有利弊,但均无法实现无损仿

的分布式监测^[1-3]。目前,已有许多研究人员将光纤通信技术应用到高温环境中监测。SANDLIN S 等人^[4]将光纤布喇格光栅(FBG)的涂覆层改用金属涂覆,可在环境温度 600 ℃时工作相当长的时间,同时温度也保持线性传感特性;谭跃刚等人^[5]验证了一种最高能测量 600 ℃的光纤 Fabry-Perot 高温传感器;马贝贝^[6]验证了普通单模光纤可以承受 1000 ℃的高温,且至少在 100 min 内使传光性能保持不变;BULOT P 等人^[7]提出了一种单模掺铒光纤,在 800 ℃高温下可以有效进行光频域反射计(OFDR)分布式光纤传感,精度可达到厘米级。以上研究表明,虽然使用普通单模光纤监测焊接残余应变具有可行性,但是目前无人将 OFDR 技术用在焊接残余应变的监测中。

本文基于 OFDR 技术进行光纤标定试验后,研究分布式光纤监测技术在钢结构焊接残余应变监测上应用的可能性,并进行工字钢焊接残余应变监测试验。

收稿日期:2022-03-29。

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:51308369)资助。

作者简介:丁家富(1998—),男,江苏盐城人,硕士研究生,现就读于苏州科技大学土木水利专业,主要研究方向为使用光纤布喇格光栅传感器和光频域反射计分布式光纤传感器对工程结构(包括桥梁结构)进行健康监测。

*通信作者:王大鹏(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为桥梁健康监测与抗震。



1 OFDR 技术原理

OFDR 是基于瑞利散射的温度及应变测量的技术,其基本原理如图 1 所示。光源发出扫频光波后,经耦合器分成 2 路:一路进入传感光纤,传播过程中产生瑞利散射信号,被作为信号光经耦合器耦合到光电探测器中;另一路光经过反射后作为参考光也被耦合到光电探测器中。2 种耦合信号经过处理得到信号光与参考光的拍频频率。传感光纤上每点的物理位置均与该点的拍频频率呈线性关系,因此可以实现光纤沿线的定位。在进行温度或应变传感时,首先对光纤进行扫描,得到参考状态及测量状态的瑞利散射信号;然后,根据试验需要,选择合适的移动窗(空间分辨率)将参考状态及测量状态得到的瑞利散射信号划分为多个信号窗口,通过互相关运算计算每个信号窗口的频谱移动;最后,结合相应的温度/应变频移系数,得到该处的温度/应变变化。所测温度/应变为移动窗内平均温度/应变。

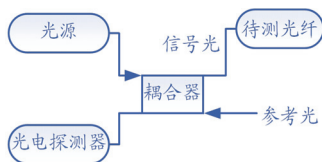


图 1 OFDR 原理图

2 工字钢焊接试验与分析

2.1 光纤标定试验

本试验采用的传感光纤为深圳市狼之光科技有限公司生产的 G.652.D 型单模裸光纤,光纤直径为 125 μm 。OFDR 解调仪选择的是苏州南智传感科技有限公司生产的 OSI-C 型分布式高精度光频域应变温度分析仪(如图 2 所示),仪器的最大测量距离为 100 m,空间分辨率最大可达 1 mm,应变传感精度为 $\pm 1.0 \mu\text{e}$,等强度梁的工作尺寸为: $l \times B \times h = 300 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 3.48 \text{ mm}$,等强度梁的应变计算式为

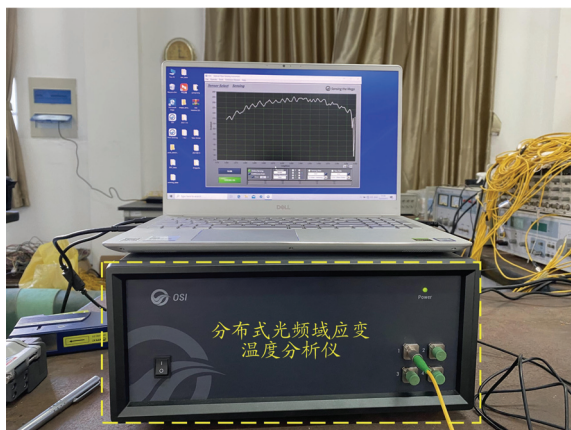


图 2 OFDR 解调仪实物图

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{E} \frac{l}{h^2 B} \quad (1)$$

其中, l 、 h 、 E 分别为等强度梁的长度、厚度、弹性模量 ($E=200 \text{ GPa}$), B 为承重处的宽度, σ 为梁截面受到的拉应力, P 为等强度梁受到的作用力。

试验选用的胶剂为美斯国顿耐高温密封胶,主要参数如表 1 所示。

表 1 胶剂主要参数

胶剂类型	位移能力	耐温范围/ $^{\circ}\text{C}$	固化时间/h
耐高温有机胶	$\pm 50\%$	$-50 \sim 500$	48

为检测光纤的测量精度及受高温后胶剂与光纤的工作状态,本文采用光纤标定法^[8-9]进行标定。试验过程如下:首先,在 2 个等强度梁上分别布置好光纤(组 1、组 2),放置 48 h 后将光纤连接到 OFDR 解调仪上;然后,在等强度梁顶端采用法码(分 6 级,每级重 0.5 kg)施加集中荷载;最后,将其中一个等强度梁用酒精灯逐段灼烧(高温组,如图 3 所示),酒精灯可以使物体加热至 $400 \sim 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。等完全冷却后,试验以与组 1、组 2 相同的方式进行加载。



图 3 酒精灯灼烧等强度梁实物图

分布式光纤应变与理论应变的对比情况如表 2 所示,2 组光纤(组 1、组 2)在每级荷载下的应变基本一致。对比高温组与组 1 可知,灼烧后的光纤应变在每级荷载下仅损失 $3 \mu\text{e}$ 左右(每级累加)。所有测点距离焊

表 2 分布式光纤应变与理论应变的对比

应变级别	应变值/ μe				
	理论值	组 1	组 2	高温组	损失值
一级	82.5736	79.9827	80.5849	77.3994	2.5833
二级	165.1473	160.8588	160.9682	154.3754	6.4834
三级	247.7209	240.6224	241.3313	231.2103	9.4121
四级	330.2946	319.7117	321.0896	307.38	12.3317
五级	412.8682	400.0315	401.8157	384.1342	15.8973
六级	495.4419	481.4807	481.7756	460.8481	20.6326

点的最近位置为 3 cm, 此处温度为 200~300 °C^[10-11], 远低于 500 °C, 故光纤因焊接高温导致的应变损失可以忽略不计。图 4 为理论值与组 1 光纤测量值的拟合曲线, 线性相关性系数 R^2 达 0.99998, 两者高度相关。考虑到试验中存在误差, 可以认为分布式光纤所测应变为实际应变。

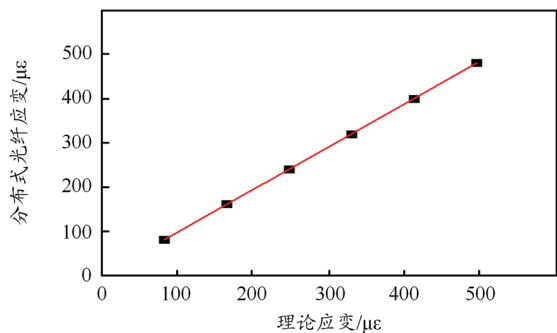


图 4 理论值与组 1 光纤测量值的拟合曲线

2.2 工字钢焊接试验

试验中, 共设计了 2 组工字钢试件, 钢板采用 Q345B 级钢, 详细尺寸如表 3 所示。腹板与翼缘采用角焊缝连接, 焊接方式采用电弧焊。

表 3 试件尺寸(单位: mm)

组别	上翼缘		下翼缘		腹板		长度
	宽度	厚度	宽度	厚度	高度	厚度	
1	350	14	250	14	650	10	650
2	350	14	250	14	650	10	650

将钢板用无水乙醇清理干净后, 分别在正反两面沿长度(纵向)与宽度(横向)方向呈 S 形布置光纤, 上下翼缘板在沿长度方向预留焊缝(如图 5 所示)。待胶剂完全凝固后, 通过点焊使工字钢成型。将光纤连接解调仪测量参考值后, 按同一方向以先焊接下翼缘, 再焊接上翼缘的顺序施焊。焊接过程中为防止熔渣对胶体保护外的裸纤造成破坏, 两侧用木板进行保护。

2.3 试验数据处理与分析

图 6 为 2 组工字钢在 32.5 cm 截面处上翼缘横向

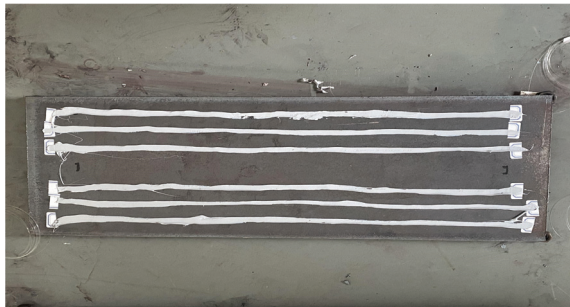


图 5 光纤布置实物图

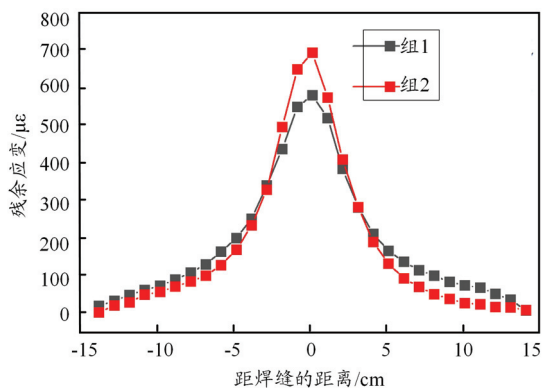


图 6 32.5 cm 截面处横向残余应变分布图

残余应变分布图。最大值往往出现在焊缝处, 且 2 组整体变化趋势一致。图 7 为 2 组工字钢各截面的上翼缘横向残余应变极值分布图。2 组曲线整体形式一致, 但极值差别较大, 可能是因为人工焊接导致焊接质量有所不同。

图 8、图 9 分别为 2 组工字钢上翼缘纵向残余应变分布图(14 cm、12 cm、9 cm、6 cm 和 3 cm 为各测点距焊缝距离)。可以看出, 2 组变化趋势一致; 距离焊缝越近, 残余应变越大; 均在截面 32.5 cm 左右处, 残余

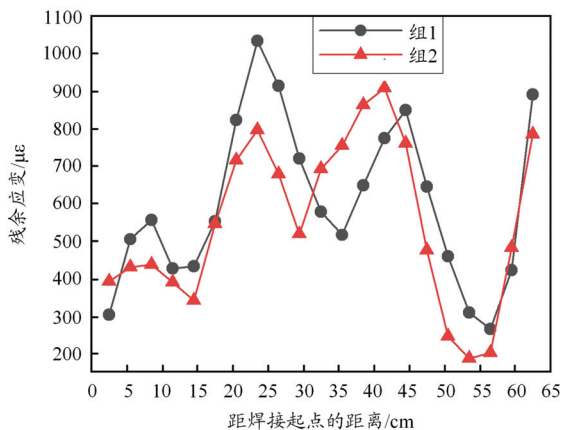


图 7 横向残余应变极大值分布图

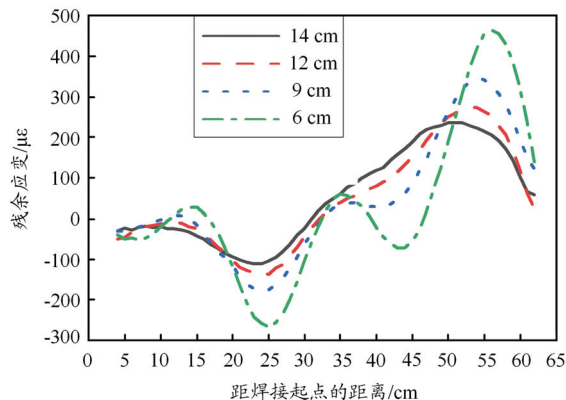


图 8 组 1 纵向残余应变分布图

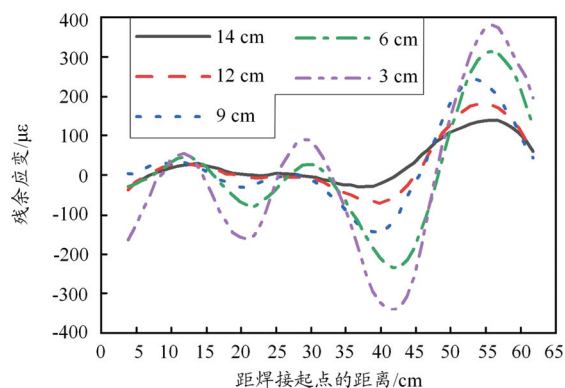


图9 组2纵向残余应变分布图

应变趋于0。与图7对比可得,在相同位置区域,横向残余应变极值与纵向残余应变变化的趋势相反;与图6对比可得,横向残余应变均为拉应变,而纵向残余应变不定。

3 结束语

本文采用 OFDR 技术进行了工字钢焊接残余应变监测试验,对比了上翼缘的残余应变变化规律。尽管试验中部分光纤因各种失误而丢失了试验数据,但所测得的2组实验数据规律一致,充分证明了 OFDR 技术可以实现焊接残余应变的监测。与传统检测手段相比,OFDR 技术的分布式、无损监测对钢结构更加友好,具有广阔的应用前景。针对所监测到的残余应变,后续仍将监测其是否会随时间推移而改变,并采取实

际工程常用的残余应力释放方式,对高应变区进行应力消除,监测残余应变实际的释放情况。

参考文献:

- [1] 张壮南,王春刚,田路.单轴对称焊接工字形截面残余应力试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(6):236-244.
- [2] 黄永辉,王荣辉,甘泉. 钢桁梁桥整体节点焊接残余应力试验[J]. 中国公路学报,2011,24(1):83-85.
- [3] 王国周,赵文蔚. 焊接与热轧工字钢残余应力的测定[J]. 工业建筑,1986(7):33-38.
- [4] SANDLIN S, KINNUNEN T, R M J, et al. A simple method for metal recoating of optical fibre Bragg gratings[J]. Surface and Coatings Technology, 2006(6): 3061-3065.
- [5] 谭跃刚,马贝贝,俞强.一种高灵敏度光纤高温传感器[J]. 仪表技术与传感器,2020(6):7-11.
- [6] 马贝贝. 耐高温光纤大应变传感器及其传感特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学,2020.
- [7] BULOT P, REMY BERNARDE, CIESLIKIEWICZ-BOUET M, et al. Performance study of a zirconia-doped fiber for distributed temperature sensing by OFDR at 800 °C [EB/OL]. [2022-03-29]. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3788/htm>.
- [8] 索文斌,施斌,张巍,等. 基于 BOTDR 的分布式光纤传感器标定实验研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(9):985-989.
- [9] 安鹏举,邓清禄,薛俊卓,等. 分布式光纤应变系数标定方法与试验[J]. 安全与环境工程,2019,26(5):143-146.
- [10] 李玉龙,姜智超,冯艳,等. 低碳钢薄板 TIG 焊热影响区温度光纤光栅测量[J]. 光通信技术,2012,36(1):53-55.
- [11] 刘吉晓,贺鹏飞,吴艾辉. T 型长板焊接温度场与应力场分析[J]. 钢铁钒钛,2018(5):149-156.