

基于红外热成像的涂层厚度检测及均匀性评价

杨 羿, 刘 朵, 张建东

(苏交科集团股份有限公司 在役长大桥梁安全与健康国家重点实验室, 南京 211112)

摘 要: 锁相红外涂层厚度检测技术具有非接触、面测量等优势, 具有广阔的应用前景。制作变厚度涂层试件对锁相红外涂层厚度检测参数进行优化, 建立了锁相红外涂层厚度检测标定曲线, 制定了其涂层厚度检测合格要求与均匀性评价方法。最后, 通过试验验证了基于锁相红外热成像技术的涂层均匀性评价方法的准确性和有效性。

关键词: 锁相红外热成像; 涂层厚度; 标定曲线; 均匀性

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)01-0023-05

Coating thickness detection and uniformity evaluation based on infrared thermography

YANG Yi, LIU Duo, ZHANG Jiandong

(The State Key Laboratory on Safety and Health of In-service Long-span Bridge, JSTI Group, Nanjing 211112, China)

Abstract: Phase-locked infrared coating thickness detection technology has the advantages of non-contact and surface measurement, and has broad application prospects. In this paper, the phase-locked infrared coating thickness detection parameters were optimized by using variable thickness coating specimens, the phase-locked infrared coating thickness detection calibration curve was established, and the coating thickness detection qualification requirements and requirements based on phase-locked infrared thermal imaging technology were formulated. Finally, the accuracy and effectiveness of the coating uniformity evaluation method based on lock-in infrared thermal imaging technology were verified by experiments.

Key words: phase-locked infrared thermography; coating thickness; calibration curve; uniformity

防腐涂装是钢结构桥梁防止锈蚀、延长寿命的主要措施, 能够有效隔绝腐蚀介质, 使钢材保持良好的耐久性。涂装质量的控制在施工过程中非常重要, 涂层厚度成为其关键控制指标。

目前, 涂层厚度常用的检测方法有磁性测厚法、涡流测厚法、超声波测厚法^[1], 但是这些方法仅能得到测点涂层厚度, 检测结果与测点选择相关性大, 无法对所检测区域的涂层厚度进行客观、快速评价。

红外热成像检测技术具有非接触、检测面积大等优势, 逐渐受到人们的重视。针对红外热成像涂层厚度检测研究亦较广泛, 江海军等^[2-3]分别采用锁

相与激光红外热成像技术对涂层厚度进行了测试, 验证了测试结果的重复性和测量精度。何凌云^[4]针对持续激励红外涂层厚度检测, 设计了基于温度曲线的涂层厚度测量方法。陈思琪^[5]搭建了连续波红外无损检测系统, 比较了方波与正弦波检测结果的信噪比。SHRESTHA 等^[6-7]针对锁相与脉冲两种技术对热障涂层厚度的检测效果进行了对比分析, 结果表明两种技术均能有效测量热障涂层厚度。随着红外热成像技术在涂装性能检测领域的研究和应用, 探索红外热成像对涂层厚度的大范围快速检测和客观评价具有重要的工程意义和应用价值。

文章开展了锁相红外防腐涂层厚度检测试验分析。通过制作变厚度涂层试件并进行试验, 对锁相红外的检测参数进行优化; 基于试验结果, 建立锁相红外涂层厚度检测标定曲线; 在现有规范的基础上, 制定了基于锁相红外热成像技术的涂层厚度检测合

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 江苏省交通运输厅科技项目(2021Y14-1)

作者简介: 杨 羿(1993—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事桥梁检测工作

通信作者: 杨 羿, 774991168@qq.com

格要求与均匀性评价方法。文章结果可为钢桥涂层厚度的检测评估带来新的思路和手段,为涂装质量的检验评定提供科学依据。

1 锁相红外涂层厚度检测原理

锁相红外无损检测系统由红外热像仪、调制热源、控制系统组成,其检测原理如图 1 所示。采用锁相红外热成像技术进行涂层厚度检测时,首先利用调制热源对涂层表面施加强度按正弦规律变化的

激励,激励信号会使得涂层内部热量积累,表面温度升高;部分热能以热波形式在涂层内部传播,当热波遇到涂层与基体的界面时,由于热波载体的热学性质发生变化,部分热波将被反射;当热波返回涂层表面时,与调制热源施加的激励信号相叠加,改变了涂层表面的温度分布,红外热像仪可检测到温度呈正弦上升变化的涂层表面序列热图,此时涂层表面温度变化的相位表征了激励信号与反射信号的差异,反映了被检涂层的厚度。

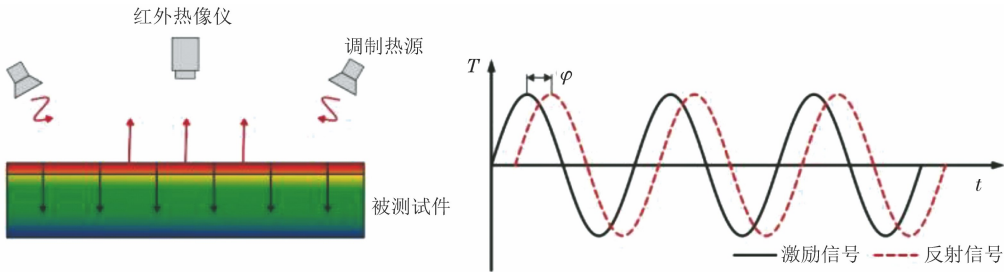


图 1 锁相红外涂层厚度检测原理

2 试件制备与试验方法

2.1 试件制备

文章试验制作了 1 块变厚度涂层试件与 6 块等厚度涂层试件,试件信息如表 1 所示,试件基底选用 Q345qD 钢材,涂层材料选用钢结构桥梁常用的环氧富锌涂料,按照 JT/T 722—2023《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》进行喷砂处理,试件尺寸(长×宽×高)为 180 mm×60 mm×8 mm。其中试件 Bh1 用于研究锁相红外涂层厚度检测过程中的激励频率的选择。基于优化后的激励频率,对试件 Dh1~Dh6 的涂层均匀性进行评价。试件 Bh1 的制作工艺如图 2 所示,喷涂过程中,喷头移动速度逐渐减小,涂层厚度也因此逐渐增加。使用磁性测厚仪测试试件中线涂层厚度,结果如图 3 所示,可以看出在距离顶部 0~10.5 cm 内,涂层厚度呈线性变化。

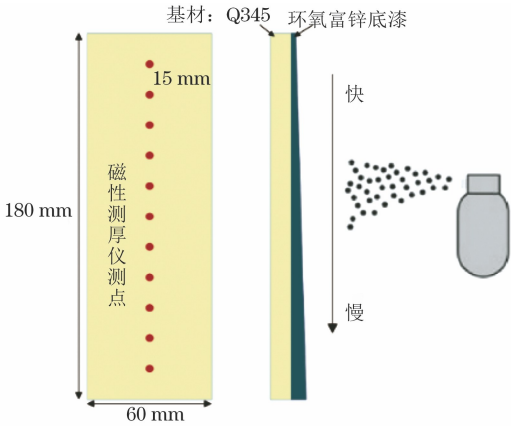


图 2 变厚度涂层试件 Bh1 制作工艺示意

表 1 涂层试件信息

试件编号	试件类型	设计涂层厚度/ μm
Bh1	变厚度	100~400
Dh1	等厚度	100
Dh2	等厚度	100
Dh3	等厚度	100
Dh4	等厚度	200
Dh5	等厚度	200
Dh6	等厚度	200

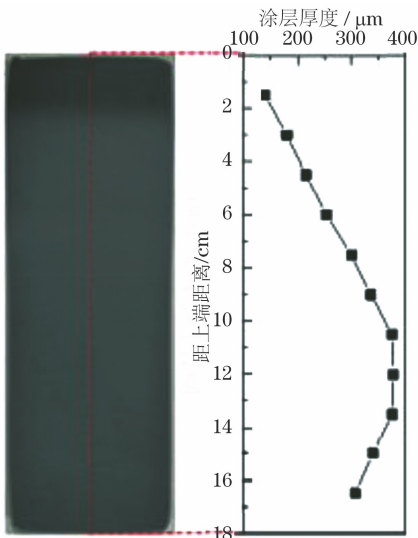


图 3 磁性测厚仪测得的试件厚度

红外检测设备采用南京诺威尔光电有限公司研发的锁相红外热成像无损检测系统,热激励总功率为 400 W,图像分辨率为 640 像素×512 像素,采样帧频为 20 Hz。其激励频率可调,经过试验测试,涂层表面温度变化的相位差在 8~10 个周期后会趋于稳定,同时为了提高检测效率,控制检测时间在 2 min 以内,试验对比了 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 Hz 共 6 种不同激励频率的检测结果。

2.2 激励频率优化

6 种不同激励频率的锁相红外热成像检测结果如图 4 所示(图中相位为弧度制表示,无单位,下

同),同时文章提取了试件中线上的相位差变化曲线。选取磁性测厚仪测点位置对应的相位差,得到涂层厚度相位差关系曲线,如图 5 所示。由图 5 可见,激励频率为 0.1 Hz 时,涂层厚度相位差关系曲线单调递减,斜率较为均匀,具有足够分辨率;激励频率为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 Hz 时,相位差先减小后增大,这是因为频率较高时,热波波长较短,无法检测厚度较大的涂层内部信息。此外,随着激励频率降低,检测时间大大增加。因此,考虑有效性与经济性原则,防腐涂层锁相热成像涂层厚度检测激励频率选择采用 0.1 Hz。

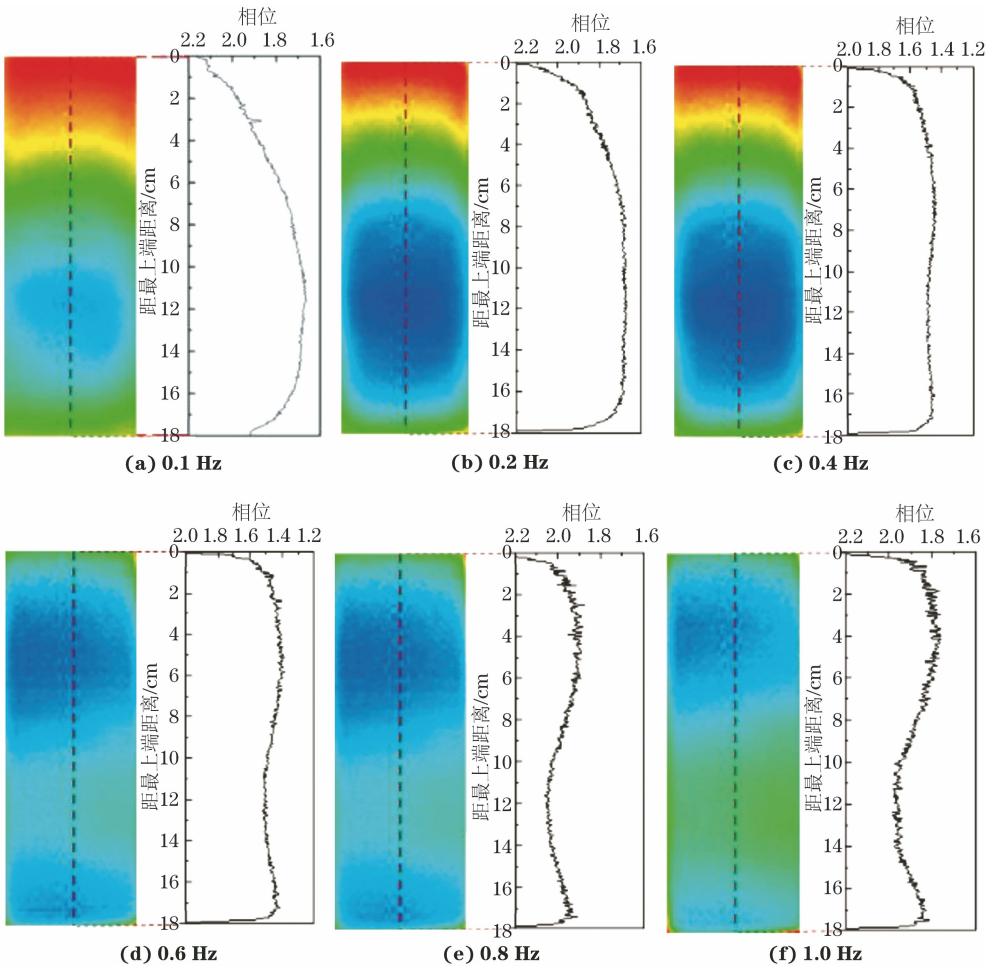


图 4 不同激励频率的涂层厚度相位差关系曲线

2.3 标定曲线

为了制定锁相红外涂层厚度的检测标定曲线,采用线性函数对测试结果进行拟合,如式(1)所示。

$$d = 1\,724 - 807\varphi \quad (1)$$

式中: d 为涂层厚度; φ 为锁相红外检测相位差。

实测结果与锁相红外拟合结果对比如图 6 所示,其中横轴为锁相红外检测相位差,纵轴为涂层厚度。由图 6 可以看出测量值均匀分布在拟合曲线周围,拟

合得到的最大偏差为 7.8 %,整体拟合度 $R^2 = 0.986$,即锁相红外涂层厚度检测具有较高的检测精度。

3 涂层均匀性评价

3.1 检测结果分析

试件 Dh1~Dh6 的涂层厚度检测结果云图如图 7 所示,对整个测面的涂层厚度检测结果进行统计,并绘制频率直方图,如图 8 所示。由图 8 可知,锁相

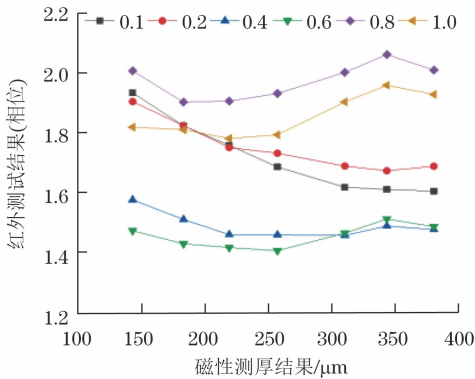


图 5 不同频率时涂层厚度与相位的关系

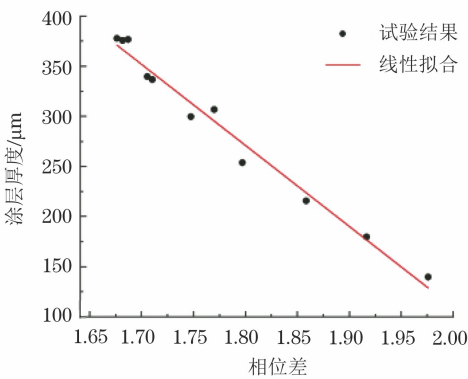


图 6 涂层厚度的试验结果与拟合曲线

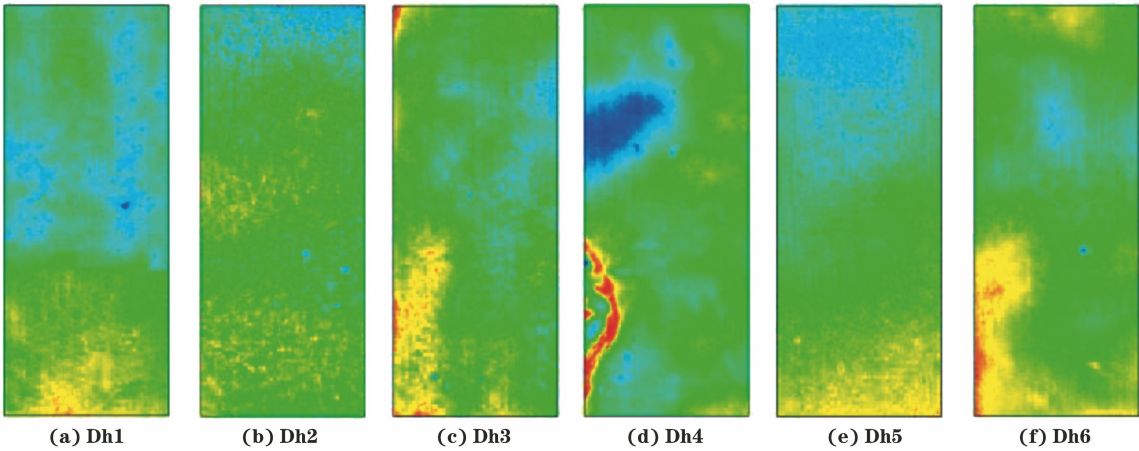


图 7 涂层厚度检测结果云图

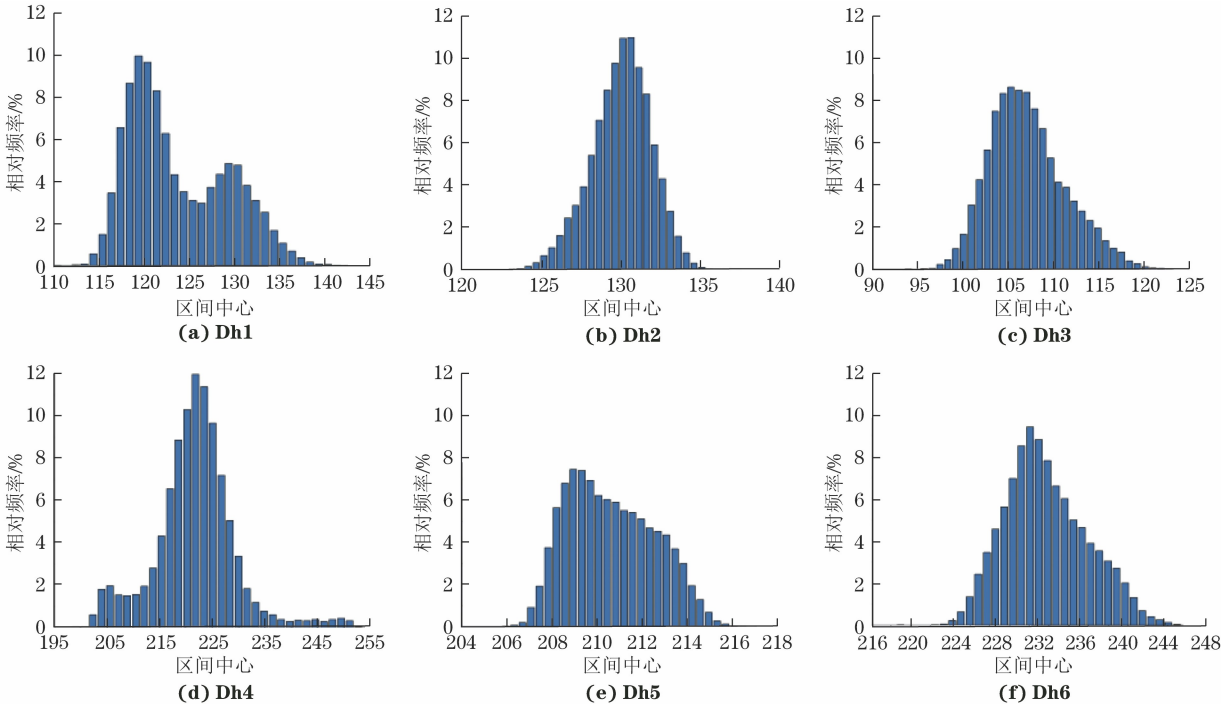


图 8 涂层厚度频数分布图

红外热成像技术可以直观地看出涂层厚度的分布情况,其中试件 Dh1 与 Dh4 均匀性较差,试件 Dh1

的频率直方图呈现明显的双峰分布态势,从云图中可以看出试件下半区的涂层厚度明显高于上半

区的;试件 Dh4 的检测结果云图呈现局部涂层厚度不均匀状态,原因可能是在涂装过程中发生了流挂现象。

3.2 合格要求与均匀性指标

JTG F80/1—2017《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》中要求:涂层厚度小于设计值的测点数量 $\leq 10\%$,任意测点的涂层厚度 \geq 设计值的 90% ,涂层厚度合格。锁相红外涂层厚度检测采用面测量的方式,考虑到整个测面每一个像素点的涂层厚度不小于设计值的 90% 过于严格,参考上述规范制定了锁相红外涂层厚度检测的合格要求:涂层厚度小于设计值的像素点数量百分比 $t_1\leq 10\%$ 。检测结果如表 2 所示(其中 ω 为涂层均匀性指标),可以看出 6 个试件中只有 Dh3 不合格,其余均合格。

表 2 试件涂层厚度合格指标与均匀性指标

编号	均值/ μm	$t_1/\%$	0.05 分位	0.95 分位	ω
Dh1	123.9	0	116.8	133.6	0.136
Dh2	130.1	0	126.7	133.1	0.049
Dh3	107.1	18.2	101.1	115.0	0.130
Dh4	221.6	0.1	207.0	233.2	0.118
Dh5	210.6	0	207.8	213.9	0.029
Dh6	233.7	0	227.3	241.2	0.059

上述指标可以作为涂层质量合格与否的判断依据,其中的涂层均匀性指标 ω 可用于进一步判断涂装的质量与水平,其可用式(2)表示,并建立了涂层均匀性评价标度,如表 3 所示。结合表 2 中试件 Dh1~Dh6 的 ω 计算结果,判断试件 Dh2、Dh5 的均匀性为优,试件 Dh6 的均匀性为良,试件 Dh1、Dh3、Dh4 的均匀性为差。

$$\omega = \frac{d_{0.95} - d_{0.05}}{\bar{d}}$$

(2)

式中: $d_{0.95}$ 为 0.95 分位涂层厚度; $d_{0.05}$ 为 0.05 分位涂层厚度; \bar{d} 为涂层厚度均值。

表 3 涂层均匀性评价标度

评价标度	优	良	差
ω	0~0.05	0.05~0.10	0.10~1

4 结论

文章通过制作变厚度涂层试件,开展了锁相红外涂层厚度检测试验分析,对试验检测参数进行了优化,并建立了标定曲线,在现有规范的基础上制定了涂层质量检验合格要求与均匀性评价方法,得出以下结论。

(1) 对比了 6 种激励频率的检测效果,激励频率为 0.1 Hz 时可同时满足锁相红外涂层厚度检测的准确性与经济性要求。

(2) 制定了激励频率为 0.1 Hz 的锁相红外涂层厚度检测标定曲线: $d=1\,724-807\varphi$ 。试验测试结果最大偏差为 7.8%,整体拟合度 $R^2=0.986$,曲线的准确性较好。

(3) 基于锁相红外涂层厚度测试结果,采用涂层厚度小于设计值的像素点数量百分比制定了锁相红外涂层厚度测试合格要求,采用 0.05 分位,0.95 分位的涂层厚度和涂层厚度均值,制定了涂层均匀性指标 ω ,为涂装质量检验评定提供科学依据。

参考文献:

[1] 杨华,董世运,徐滨士. 涂镀层厚度检测方法的发展现状及展望[J]. 材料保护,2008,41(11):34-37,71.

[2] 江海军,陈力. 锁相热波成像技术对涂层厚度的测量[J]. 无损检测,2017,39(4):38-41,48.

[3] 江海军,陈力. 激光扫描红外热波成像在膜厚测量中的应用[J]. 红外技术,2017,39(12):1144-1148.

[4] 何棱云. 基于红外无损检测技术的涂层厚度检测方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.

[5] 陈思琪. 基于红外热波无损检测技术的表面涂层厚度检测[D]. 成都:电子科技大学,2022.

[6] SHRESTHA R, KIM W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: a comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography - Part I: Simulation [J]. Infrared Physics & Technology,2017,83:124-131.

[7] SHRESTHA R, KIM W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: a comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography - Part II: experimental investigation [J]. Infrared Physics & Technology,2018,92:24-29.