

# 基于红外热成像的钢管混凝土脱空缺陷检测研究

何健<sup>1,2</sup>, 张佶<sup>1,2</sup>, 王航<sup>1,2</sup>, 钱娟<sup>1,2</sup>, 邵志伟<sup>3</sup>, 戴爽<sup>3</sup>, 查晓雄<sup>3\*</sup>

(1. 中国二十冶集团有限公司, 上海 201999; 2. 广东二十冶建设有限公司, 广东 珠海 519090;

3. 哈尔滨工业大学(深圳) 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 钢管混凝土(concrete-filled steel tubular, CFST)构件在施工过程中, 会因施工人员操作不当、混凝土发生收缩等原因使其内部产生不密实缺陷, 其中脱空缺陷会削弱钢管与混凝土之间的相互作用, 导致构件承载力下降。因此有必要加强对CFST构件脱空缺陷的检测。本文提出了一种基于红外热成像法对CFST进行脱空缺陷检测的方法, 相关理论研究表明: 当结构存在缺陷或损伤时, 该结构的热物理特性会发生变化, 体现为物体表面局部温度发生异常。进行红外热成像法检测CFST脱空缺陷试验研究, 结果表明红外热成像技术能够有效检测CFST脱空缺陷, 该缺陷判断指标分别为: 试件加热后的温度差为3℃及监测范围内降温速率比大于1.1。

**关键词:** 钢管混凝土; 红外热成像; 脱空缺陷; 无损检测; 降温速率

中图分类号: TU398<sup>+.9</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)07-0073-08

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240224001

## Research on Detection of Gap Defect of Concrete-Filled Steel Tube Based on Infrared Thermal Imaging

HE Jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji<sup>1,2</sup>, WANG Hang<sup>1,2</sup>, QIAN Juan<sup>1,2</sup>, SHAO Zhiwei<sup>3</sup>,  
DAI Shuang<sup>3</sup>, ZHA Xiaoxiong<sup>3\*</sup>

(1. China MCC20 Group Co., Ltd., Shanghai 201999, China; 2. Guangdong MCC20 Construction Co., Ltd.,

Zhuhai 519090, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute

of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

\*Corresponding author: zhahero@126.com

**Abstract:** During the construction of concrete-filled steel tubular (CFST) members, the internal defects are caused by improper operation and shrinkage of concrete. Among them, the gap defect will weaken the interaction between steel tube and concrete, resulting in the decline of the bearing capacity of members. Therefore, it is necessary to strengthen the detection of the gap defect of CFST members. In this paper, a detection method based on infrared thermal imaging is proposed. Relevant theoretical studies show that when the structure is defective or damaged, the thermal physical characteristics of the part will change, which is reflected in the local temperature anomaly on the surface of the object. Infrared thermal imaging method was used to experimentally detect the gap defects of

收稿日期: 2024-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(52178129), 深圳市科技计划项目(GJHZ20220913143007013、KCXST20221021111408021)

作者简介:

何健(1978—), 男, 学士, 正高级工程师, 主要从事组合结构方面的研究。E-mail: 1765193340@qq.com。

张佶(1992—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事组合结构方面的研究。

通信作者:

查晓雄(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事组合结构方面的研究。E-mail: zhahero@126.com。

CFST member. The results show that the method can effectively detect the gap defects of CFST members. The detection indexes are as follows: the temperature difference after member heating is 3 °C and the cooling rate ratio is greater than 1.1 in the monitoring range.

**Keywords:** concrete-filled steel tube; infrared thermal imaging; gap defect; non-destructive testing; cooling rate

钢管混凝土 (concrete-filled steel tubular, CFST) 柱因其优异的受力特性,且能充分发挥钢材与混凝土间的协同工作性能,被广泛应用于大尺寸桥梁、超高层建筑等工程中<sup>[1]</sup>。目前CFST构件在施工中普遍存在一些质量问题,如因混凝土材料选用不当、振捣过程中操作不到位等导致混凝土内部产生各种缺陷,如蜂窝、空洞、脱空等,具体如图1所示。若钢管内部设置加强结构或附加其他连接,则更易出现缺陷<sup>[2-4]</sup>。红外热成像法检测具有简便、实用、高效的特点,该方法主要用于检测构件的界面脱空缺陷。

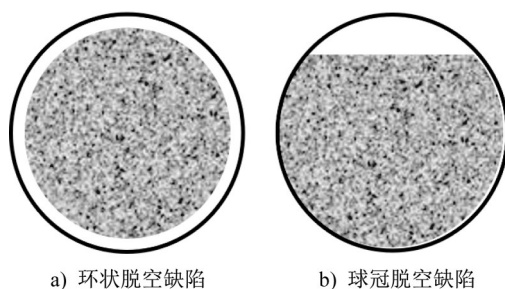


图1 CFST构件常见缺陷形式

Fig. 1 Common internal defects in CFST members

近年来,红外线热成像检测法在土木工程、建筑等领域中的应用受到了科研人员的广泛关注,国内外多名学者都对红外线热成像检测法的可行性进行了探索研究。TITMAN等<sup>[5]</sup>使用红外热成像无损检测法对混凝土构件的内部缺陷进行了检测,在不同的检测条件下展开了相应的试验研究。该研究团队给出了各种检测情况下采用红外热成像无损检测法最适宜的测量时间、条件和角度,并对此种方法的不足给出了指导性建议。MAIERHOFER等<sup>[6]</sup>利用红外热成像检测法与探地雷达法,对混凝土结构表层损伤进行了检测。研究人员将两种方法进行了对比分析,结果表明在特定情况下,红外热成像检测法要优于探地雷达法。高翔<sup>[7]</sup>利用红外线热成像检测法识别混凝土路面的脱粘情况。并将数值模拟结果与试验结果进行对比分析后得出红外线可探测到的最大厚度,并初步探讨了脱空形态与外表面温度场之间的关系。张永健等<sup>[8]</sup>研究了红外线热成像检测法在路面缺陷识别中的应用,针对混凝土路面板底是否存在脱空进行了红外热成像分析,并采用钻孔法进行了验证。从红外线热图像中可以发现,当板底出现缺陷时,红外线热像

图上会出现不均匀温度场。段涵屹等<sup>[9]</sup>利用红外热成像法检测涂层质量,发现涂层厚度越大缺陷越容易被检测,基体厚度越大缺陷越难被检测。潘晓花<sup>[10]</sup>利用红外热成像法对热工围炉缺陷进行检测时,发现该方法在应用过程中热工缺陷对比度的差异性小,检测结果的准确性高,与传统方法相比其可行性更优。

将红外热成像检测法应用于CFST无损检测的相关研究起步较晚。刘海波<sup>[11]</sup>应用有限元模拟开展了CFST脱空缺陷的红外热成像检测研究,发现水化热引起的温度差极小,需通过外部加温才能借助温度变化实现缺陷检测。马少宁<sup>[12]</sup>利用红外热成像法对CFST脱空缺陷检测进行了深入研究,发现红外热成像法不仅可以检测出脱空范围,且其检测效果与钢管厚度和加热时间有关,钢管厚度越薄,检测效果越好。杨鸿玉等<sup>[13]</sup>从有限元和试验两个方面对CFST脱空缺陷检测进行了研究,发现管壁与混凝土脱空尺寸对温度变化有影响,脱空深度对温度变化几乎没有影响。基于热传导原理,研究人员建立了CFST三维有限元模型,分别研究了不同检测因素对升温率和检测效果的影响。陈劲等<sup>[14]</sup>利用红外热成像法检测圆形CFST构件密实度,并将缺陷构件与健康构件进行了对比,提供了可供参考的脱空缺陷边界的温度变化梯度。

本文基于红外射线的辐射原理以及不同物质的热传递差异理论,以CFST中常见的脱空缺陷和边缘空洞缺陷为研究对象,选择钢管与混凝土界面不存在缺陷的构件作为健康对照组。通过试验探究对温度数据进行了分析,验证了该方法检测缺陷的有效性并给出缺陷判断指标。

## 1 红外热成像法试验研究理论基础

### 1.1 红外热成像技术简介

当物体温度高于绝对零度时,就会不断向外辐射红外线,此过程被称为热辐射。红外热成像技术通过对目标的特殊红外波带进行探测,并将其转化为可视化的图像,进而实现对目标的温度测量。该技术能够突破肉眼局限,从而实现对物体表面温度分布的观测。

### 1.2 红外热成像热传导理论

热传递的基本方式有热传导、热对流和热辐射三种,它们的热量传递机制完全不同,对应的传热方程<sup>[15]</sup>分别

为式(1)、式(2)、式(3)。

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

$$Q = h_f A (T_s - T_b) \quad (2)$$

$$Q = \epsilon \sigma A F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中:  $Q$  为热流量;  $x$  为空间坐标;  $T$  为温度;  $k$  为导热系数;  $A$  为表面积;  $h_f$  为热对流换热系数;  $T_s$  为周围流体的温度;  $T_b$  为固体表面的温度;  $\epsilon$  为辐射率或吸收率;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数;  $F_{12}$  为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数;  $T_1$  为物体 1 表面温度;  $T_2$  为物体 2 表面温度。

由于热量总是自温度高处向温度低处流动, 任意时刻不均匀的温度场都会导致热传导现象。所有材料的温度场可用式(4)表示<sup>[16]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $c$  为比热容;  $\lambda$  为导热系数;  $t$  为时间;  $q_v$  为内热源的发热功率;  $x, y, z$  为边界上的坐标。

在没有内热源的情况下, 且物体的热参数  $\rho, c$  和  $\lambda$  为常量时, 上式可简化为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (5)$$

式中:  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$  为热扩散率;  $\nabla^2$  为拉普拉斯运算符。

导热微分方程作为基础性公式, 适用于所有导热过程。但仅使用导热微分方程无法还原完整的导热过程, 对于具体过程需要添加特定的限制条件, 即单值性条件。引入单值性条件可以得到唯一确定解, 属于导热过程的特解。几何条件、物理条件、时间条件和边界条件都属于常用的单值性条件。这里主要介绍三类边界条件: 若直接给出边界处的温度值以及随时间变化的分布, 为第一类边界条件; 若给出物体边界每一时刻的热流密度分布情况, 为第二类边界条件; 若给出物体交界面处直接接触的流体温度及界面与流体间的对流换热系数, 为第三类边界条件。

### 1.3 红外热成像测试原理

检测仪器主要由三部分构成, 即传感器、信号处理和图像显示。传感器又称探测器, 是红外热成像的核心部件, 传感器能够将红外信号转化为电信号。本文使用的试验仪器为美国 FLIR 公司生产的 E8。

对构件的缺陷检测方式分为被动式检测和主动式检测。其中被动式检测不需要添加热源, 其原理是待测物体与外界环境存在温度差导致热传递, 进而引起构件表

面的温度重分布, 通过观测表面温度场的变化进行缺陷识别, 以此达到检测目的。此方法简便且易于操作, 但是测量结果存在较大误差。主动式检测是在被动式检测的基础上对构件施加热源进行检测, 其目的是打破原有热平衡状态。当构件与外部环境之间的温度差较小, 不能直接检测出结果时, 主动施加热源能使构件表面的温度重分布, 再对温度场进行测量, 以达到检测目的。这种方法需要人工施加热源, 操作复杂, 但检测效果明显优于被动检测的检测效果。

红外热成像法检测构件缺陷的基本原理如下: 当对构件施加热源时, 热量通过管壁向内部混凝土传递; 若存在脱空缺陷, 缺陷处的空气导热系数远低于混凝土的空气导热系数, 因此热量会在缺陷对应的钢管壁上聚集, 其温度高于无界面缺陷处钢管壁的温度, 在红外热成像图上表现为“高温点”。

## 2 红外热成像法试验研究

### 2.1 试验设计

为深入分析红外热成像法检测 CFST 脱空缺陷的机理共设计制作了 8 个 CFST 试件, 分为两组, 每组 4 个试件。第一组为局部脱空缺陷, 固定缺陷高度和深度, 改变缺陷宽度, 以探究缺陷面积对试件表面温度的影响; 第二组为弧形脱空缺陷, 方形和圆形各 2 个试件, 其中 1 个为健康对照组, 探究缺陷深度对试件表面温度的影响。

### 2.2 试件浇筑

试验采用强度等级为 C50 的商品混凝土, 钢管厚度为 5 mm, 钢材采用 Q235 强度等级钢。使用亚克力板制成的中空模具来模拟局部脱空缺陷(试件 1~4), 使用 EPS 高密度泡沫来模拟弧形脱空缺陷(试件 6 和 8), 缺陷粘贴后的示意图如图 2 所示。

各试件设计参数如下: 试件高度均为 300 mm, 方形试件长、宽均为 400 mm, 圆形试件直径为 400 mm。试件 1~4 中, 局部脱空缺陷宽度分别为 50 mm、100 mm、150 mm 和 200 mm, 高度均为 100 mm, 脱空厚度均为 5 mm, 立面图如图 3 所示; 试件 5~8 中, 弧形缺陷高度与试件高度相同, 宽度均为 200 mm。

### 2.3 试验测量

选择试件 1~4、试件 6 和 8 的含缺陷面进行测量, 同时选取存在中心空洞缺陷的试件 5 和 7 的无缺陷面作为健康对照组。

本文使用的红外热成像仪型号为 FLIR-E8, 测温范围为  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 分辨率为  $320 \times 240$  像素, 热灵敏度小于  $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 刷新率为 9 Hz, 环境温度设置为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 反



图2 缺陷粘贴后及混凝土浇筑示意

Fig. 2 Schematic diagrams of defect after bonding and concrete pouring

射率设置为0.8。使用红外热成像法检测CFST脱空缺陷时,被动式检测法的结果易受各种环境因素影响,主动式检测法的检测效果好于被动式检测法的检测效果,为保证检测效果本文选择主动式检测法以检测CFST脱空缺陷。为保证加热中CFST受热均匀,同时考虑到试验在户外进行,传统的红外热射线灯加热效果不佳,易收环境干扰从而导致试件受热不均匀,因此本文选择使用定制的陶瓷加热片,替代常用的红外热射灯对CFST进行加热,如图4所示。由于加热过程中无法测温,因此试验主要监测降温时段的温度变化速率和缺陷处与健康处的温度差来判别缺陷。

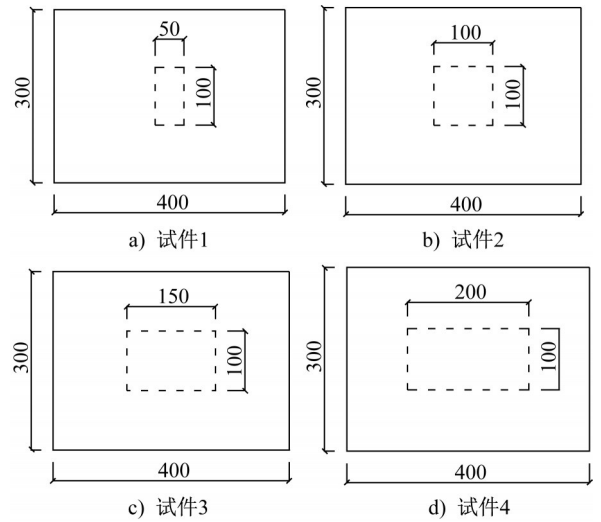
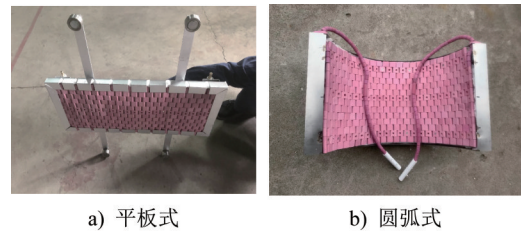


图3 局部脱空缺陷试件立面图(单位:mm)

Fig. 3 Elevation of partial void defective specimens(unit:mm)

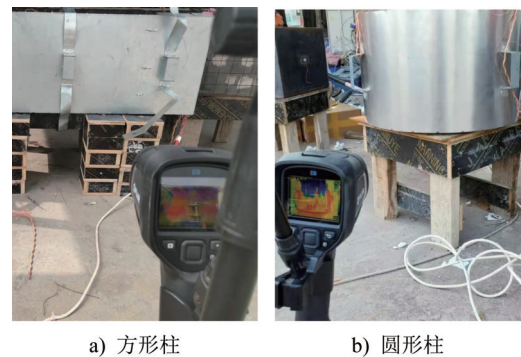


a) 平板式 b) 圆弧形

图4 平板式和圆弧形陶瓷加热片

Fig. 4 Flat and curved ceramic heating plates

在试验过程中,每个试件加热10 min,实测试件表面温度范围在60℃~90℃之间,测缺效果较好。加热结束后对试件表面进行拍摄,检测试件表面的温度场,每间隔1 min拍摄1次。试验过程中发现25 min后温度下降缓慢,此后检测意义较小,于是确定温度检测时长为25 min,试验测试过程如图5所示。



a) 方形柱 b) 圆形柱

图5 测试过程

Fig. 5 Experimental process

## 2.4 红外热成像结果分析

截面升温结束后对试件进行检测,得到试件外立面

的红外热成像结果如图6所示,在本试验中试件5和7都是选取存在中心空洞缺陷的无缺陷面作为健康对照试件以进行对比分析;试件6和8则预埋了通长的偏心空洞缺陷,缺陷区域与无缺陷区域的分界线如图中黑线所示。

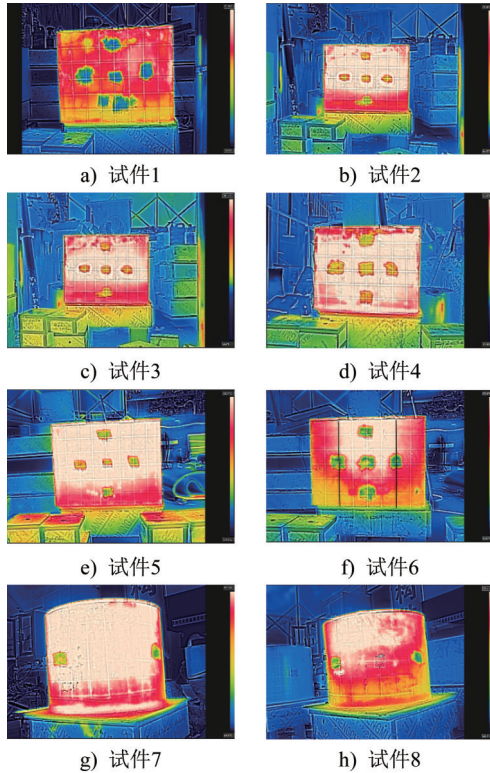


图6 红外热成像结果

Fig. 6 Infrared thermal imaging results

从图6中可知,试件6脱空范围内温度明显高于健康对照组试件温度;从试件8检测图中可知,左侧的亮度明显大于右侧的亮度。以上结果表明:预埋缺陷位置的温度高于健康部位的温度;钢管下部的温度普遍低于上部的温度,可能是由于加热板的下边缘受到钢板底板和焊缝的影响,无法与钢管柱下部分完全紧密贴合导致的。图中被打磨区域的温度值明显区别于其他部位的温度值,这是因为打磨会导致试件表面的发射率发生变化;这些区域的检测痕迹来自其他检测法,通过合理选择测区,不会对红外热成像检测产生干扰。试件1~4均未在预埋的缺陷部位处识别出明显的高亮区域,无法从图中直接判别缺陷形状。该状况可能是因为缺陷区域较小,同时打磨处位于缺陷上方,从而对成像结果产生了影响。

## 2.5 温度法数值结果分析

考虑到钢管在加热后会在钢管壁处出现高温,同时

温度又会从高温处向低温处传递,导致同一截面脱空处的降温速率会高于健康位置的降温速率。因此本文在每个试件的同一截面处选择了健康点和缺陷点来进行对比分析,比较其加热结束后的温差与降温速率来判断是否存在缺陷。对于设置脱空或偏心空洞缺陷的试件,图7中红点对应脱空区域,定义为缺陷点;蓝点对应健康区域,定义为健康点。试件5和7对应其他试件缺陷点的位置定义为健康点1;对应其他试件健康点的位置定义为健康点2,其温度的测量数据如表1所示,并据此绘制图8。

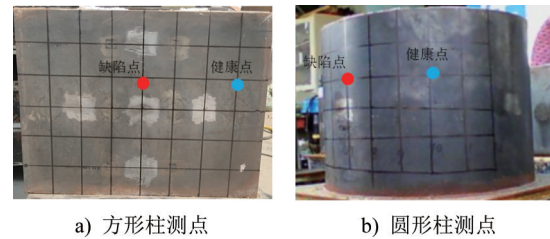


图7 试件温度测点位置

Fig. 7 The temperature measuring point location of specimens

所测试件截面上测点的温度变化情况见表1和图8,由此可知,开始记录时试件1、2、6、8缺陷点与健康点的温度有明显区别。加热结束后,初期温度迅速下降,在下降一定时间后不同测点的温度会重合,而试件3、4的两个测温点与试件5的两个测温点规律接近,并不存在明显温差和降温速率的差别。为确认缺陷是否预埋成功,采用超声波法对试件缺陷中心位置进行检测,结果显示:试件3和4的声时分别为89.4  $\mu\text{s}$ 和89.2  $\mu\text{s}$ ,与无缺陷测区的声时平均值88.9  $\mu\text{s}$ 较为接近。初步分析为:预埋中空亚克力缺陷被振捣破坏,混凝土渗入。

停止加热后,缺陷处与健康位置存在温差,同时温度从高温处向低温处传递,本文通过起始的温差值以及升温结束后截面缺陷点和健康对照点的降温速率来识别缺陷。通过式(6)来计算降温速率:

$$\text{降温速率} = \frac{\text{加热结束时温度} - \text{测点最低温度}}{\text{降温时间}} \quad (6)$$

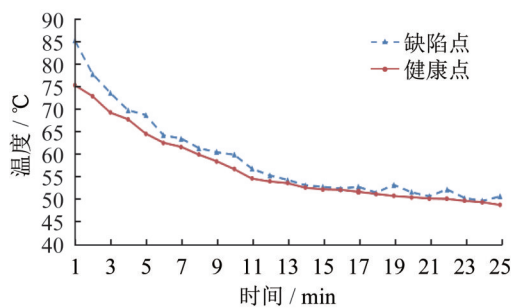
将截面的初始温差和计算得到的各试件降温速率进行均值处理,汇总于表2和表3中。

通过前文分析可知试件3和4预埋的中空亚克力缺陷被破坏,有混凝土渗入,预设脱空缺陷处存在混凝土,则近似认为试件3和4为健康工况。由表2和表3可知,存在缺陷时,缺陷点与降温点的温度差大于3  $^{\circ}\text{C}$ 。缺陷点的降温速率明显大于同一截面上健康点的降温速率。不同试件之间由于加热及其他外部条件难以完全一致,

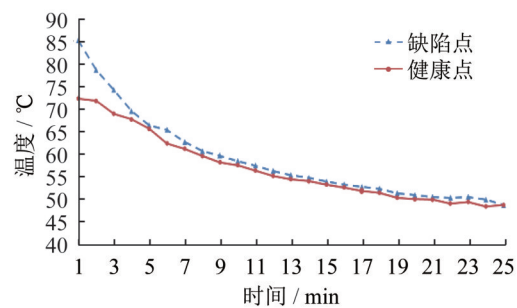
表1 试件1~8温度点变化情况

Table 1 Changes of temperature in the specimen 1 to 8

时间/ min	试件 1缺陷 点	试件 1健康 点	试件 2缺陷 点	试件 2健康 点	试件 3缺陷 点	试件 3健康 点	试件 4缺陷 点	试件 4健康 点	试件 5健康 点1	试件 5健康 点2	试件 6健康 点	试件 6缺陷 点	试件 7健康 点1	试件 7健康 点2	试件 8健康 点	试件 8缺陷 点
1	85.0	75.2	85.2	72.4	79.0	79.9	79.8	80.1	74.9	74.2	80.2	94.6	86.9	86.5	95.8	99.7
2	77.7	72.8	78.7	71.9	74.3	74.8	74.6	75.2	69.6	68.2	77.4	88.7	85.4	86.8	90.9	95.7
3	73.5	69.2	74.3	69.0	71.6	70.4	68.2	69.0	65.9	66.9	74.5	82.4	83.7	83.3	87.8	88.3
4	69.7	67.7	69.6	67.8	64.2	64.4	66.0	67.8	65.9	65.6	72.6	78.2	81.8	82.3	83.7	85.6
5	68.6	64.5	66.5	65.7	64.0	63.5	64.7	65.0	64.8	64.2	71.4	75.0	81.0	79.4	79.9	80.3
6	64.2	62.5	65.5	62.5	64.6	63.2	63.3	62.4	63.5	62.9	68.9	71.0	77.2	80.5	75.4	75.2
7	63.4	61.6	62.8	61.3	62.0	62.1	59.9	60.4	62.6	62.7	67.2	68.3	73.2	75.1	72.1	70.3
8	61.3	59.9	60.8	59.7	62.0	61.7	58.0	58.5	61.6	62.0	66.2	66.3	72.3	74.3	68.9	66.5
9	60.4	58.4	59.7	58.3	61.0	59.8	56.7	57.9	60.8	61.5	65.3	64.7	71.9	74.4	68.8	64.2
10	59.9	56.7	58.6	57.7	60.0	58.3	55.5	56.1	59.6	60.1	62.6	62.8	70.5	72.2	66.9	61.3
11	56.8	54.6	57.6	56.5	60.2	57.9	55.0	56.0	59.6	59.1	60.0	60.8	67.3	69.7	67.6	59.3
12	55.3	54.0	56.4	55.3	56.9	56.6	54.1	55.3	58.8	58.2	58.5	59.4	66.2	69.4	66.0	57.9
13	54.3	53.6	55.5	54.6	55.6	55.4	50.2	52.7	58.1	57.9	57.9	58	65.4	68.7	64.3	55.7
14	53.1	52.6	54.9	54.2	53.4	53.6	52.9	52.4	57.6	57.7	56.8	56.8	62.1	67.2	63.8	54.5
15	52.8	52.2	54.1	53.4	52.9	52.7	53.1	52.0	56.8	57.0	55.6	55.4	61.0	65.4	61.0	53.4
16	52.4	52.1	53.4	52.8	53.0	52.6	52.2	51.9	56.1	55.9	54.9	54.6	60.5	63.3	58.5	51.6
17	52.8	51.7	52.9	52.0	51.5	51.7	50.7	50.4	55.7	55.6	53.1	53.2	60.1	64.1	57.0	50.4
18	51.5	51.2	52.5	51.6	50.7	50.6	51.5	50.2	55.6	55.3	53.4	52.4	59.3	61.7	56.8	50.0
19	53.2	50.8	51.5	50.5	50.4	49.9	48.9	49.1	55.4	55.1	52.9	52.4	58.5	61.2	55.6	49.7
20	51.6	50.5	51.1	50.2	49.2	48.7	48.1	48.7	55.1	55.0	52.0	51.8	58.4	60.6	53.3	48.6
21	50.7	50.2	50.7	50.1	49.1	48.2	47.9	48.1	54.4	54.6	51.7	50.3	58.1	60.1	52.8	47.4
22	52.2	50.1	50.5	49.2	46.8	47.7	46.7	47.6	53.1	53.5	49.8	50.0	57.6	58.5	52.0	46.9
23	50.3	49.7	50.7	49.6	48.1	47.2	47.0	47.3	52.7	53.0	49.1	49.3	56.4	58.5	51.5	46.6
24	49.7	49.4	50.1	48.6	47.3	46.7	46.3	46.7	52.6	52.8	48.0	48.8	56.1	58.8	50.9	45.7
25	50.7	48.8	48.9	48.9	45.9	46.0	46.8	46.5	52.3	52.1	47.8	48.0	55.5	56.7	50.0	45.6



a) 试件1



b) 试件2

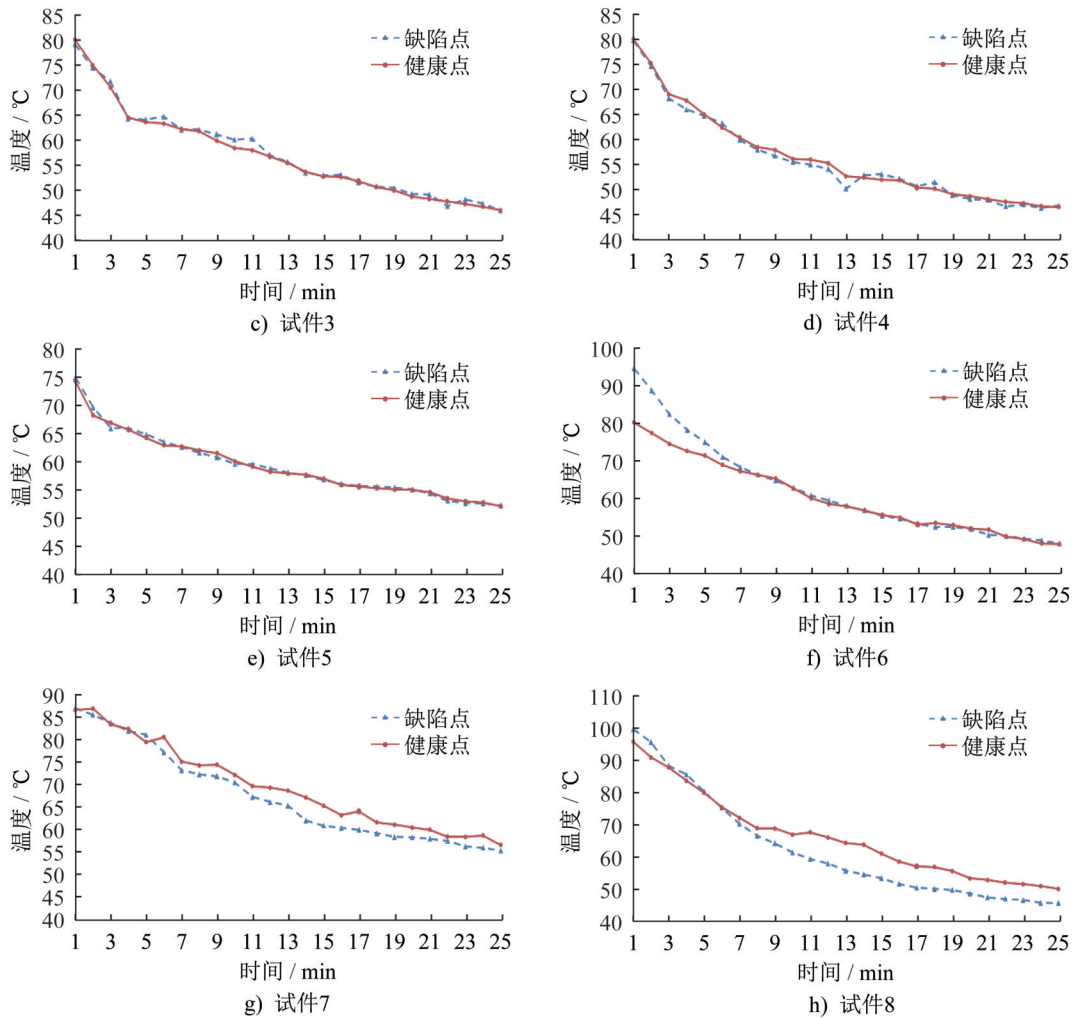


图8 测点温度变化

Fig. 8 Temperature change of measuring points

表2 缺陷试件温差及降温速率分析

Table 2 Analysis of temperature difference and cooling rate of defective specimens

试件编号	温差/°C	缺陷点降温速率	健康点降温速率	降温速率比
1	9.8	1.372	1.056	1.299
2	12.8	1.452	0.940	1.544
3	-1.1	1.324	1.364	0.970
4	0.3	1.344	1.320	1.018
6	14.4	1.864	1.296	1.438
8	3.9	2.164	1.832	1.181

表3 健康试件温差及降温速率分析

Table 3 Analysis of temperature difference and cooling rate of healthy members

试件编号	温差/°C	健康点1降温速率	健康点2降温速率	降温速率比
5	0.7	0.904	0.876	1.032
7	0.4	1.208	1.240	0.974

其健康点的降温速率存在差异。因此选择同截面不同点的降温速率比值进行缺陷识别,当同一截面某点的降温速率与已知健康点的降温速率之比超过1.1时,该测点可能存在脱空缺陷。对比试件1与试件2,可以发现随着脱空宽度的增加,温度差和缺陷点降温速率也明显增加。

### 3 结论

本文开展了基于红外热成像法检测CFST脱空缺陷的理论研究和试验研究。考虑工程中常用的钢管柱截面形式,试验共设计了8个试件;针对本研究中采用的钢材、混凝土及试件尺寸,得到如下结论:

- (1) 采用红外热成像法可有效检测圆形与方形CFST试件的脱空缺陷。且该方法操作简单,在实际工程中可与超声波法结合共同检测CFST试件脱空缺陷。
- (2) 由于空气属于隔热性介质,若存在于脱空缺陷中,对试件加热后会使其表面形成不均匀温度场,当某点

与同截面健康点的温差超过 3 ℃时,则认为存在脱空缺陷。

(3) 由于热量会从高温处向低温处传递,缺陷区域的降温速率应该高于健康区域的降温速率,当某点降温速率与同截面健康点的降温速率之比超过 1.1 时,则认为该点存在脱空缺陷。

## 参考文献:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论: 研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 1-13.  
ZHONG Shantong. Unified theory of concrete filled steel tube: Research and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 1-13. (in Chinese)
- [2] 潘群, 王腾飞, 郑寒英, 等. 钢管混凝土缺陷成因分析及其检测方法综述[J]. 重庆建筑, 2023, 22(6): 60-62. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9107.2023.06.60.  
PAN Qun, WANG Tengfei, ZHENG Hanying, et al. Cause analysis of defects in concrete-filled steel tube and a review of its detection methods[J]. Chongqing Architecture, 2023, 22(6): 60-62. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9107.2023.06.60. (in Chinese)
- [3] 王晓航, 雅菁, 尚静媛, 等. 钢板组合剪力墙界面脱空的红外热成像法检测[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(4): 91-95. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2020.04.091.05.  
WANG Xiaohang, YA Jing, SHANG Jingyuan, et al. Infrared thermography detection of the interface void of steel plate composite shear wall[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(4): 91-95. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2020.04.091.05. (in Chinese)
- [4] 庄志有. 基于外贴压电陶瓷的钢管混凝土内部缺陷检测方法研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.  
ZHUANG Zhiyou. Research on internal defect detection method of concrete filled steel tube based on piezoelectric ceramics externally attached[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019. (in Chinese)
- [5] TITMAN D J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures[J]. NDT & E International, 2001, 34(2): 149-154. DOI: 10.1016/S0963-8695(00)00039-6.
- [6] MAIERHOFER C, BRINK A, RÖLLIG M, et al. Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar[J]. NDT & E International, 2003, 36(4): 257-263. DOI: 10.1016/S0963-8695(02)00063-4.
- [7] 高翔. 混凝土路面脱空红外成像检测及有限元数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.  
GAO Xiang. Study of infrared thermography test and finite element method numerical simulation on concrete cavity beneath slab[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [8] 张永健, 张川. 红外热成像法在路面检测中的应用[J]. 建材世界, 2013, 34(5): 53-55. DOI: 10.3963/j.issn.1674-6066.2013.05.015.  
ZHANG Yongjian, ZHANG Chuan. Application of infrared thermography on the road detection[J]. The World of Building Materials, 2013, 34(5): 53-55. DOI: 10.3963/j.issn.1674-6066.2013.05.015. (in Chinese)
- [9] 段涵屹, 王邦凯, 尹松松, 等. 涂层粘接质量红外热成像检测研究[J]. 工业计量, 2021, 31(5): 28-30, 42. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2021.0120.  
DUAN Hanyi, WANG Bangkai, YIN Songsong, et al. Study on infrared thermal imaging detection of coating adhesion quality[J]. Industrial Metrology, 2021, 31(5): 28-30, 42. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2021.0120. (in Chinese)
- [10] 潘晓花. 基于红外热成像技术的建筑围护结构热工缺陷检测方法[J]. 工程技术研究, 2023, 8(4): 60-62. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2023.04.018.  
PAN Xiaohua. Thermodynamic disfigurement detection method of building envelope based on infrared thermography [J]. Engineering and Technological Research, 2023, 8(4): 60-62. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2023.04.018. (in Chinese)
- [11] 刘海波. 红外热成像技术检测钢管混凝土管壁缺陷的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
LIU Haibo. Numerical simulation study on the detection of wall defects of the concrete-filled steel tubes based on the infrared thermal imaging technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [12] 马少宁. 钢管混凝土脱空无损检测技术试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.  
MA Shaoning. Experimental study on non-destructive testing technology of concrete filled steel tube [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019. (in Chinese)
- [13] 杨鸿玉, 李赞, 危鼎, 等. 基于红外热成像技术的钢管混凝土密实度检测研究[J]. 建筑施工, 2021, 43(8): 1667-1670, 1679. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2021.08.077.  
YANG Hongyu, LI Yun, WEI Ding, et al. Research on compactness detection of concrete-filled steel tube based on infrared thermal imaging technology[J]. Building Construction, 2021, 43(8): 1667-1670, 1679. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2021.08.077. (in Chinese)
- [14] 陈劲, 陈晓东, 赵辉, 等. 基于红外热成像法和超声波法的钢管混凝土无损检测技术的试验研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊2): 444-453. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0052.  
CHEN Jin, CHEN Xiaodong, ZHAO Hui, et al. Experimental study and application of nondestructive testing technology for concrete filled steel tube based on infrared thermal imaging method and ultrasonic method[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Suppl. 2): 444-453. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0052. (in Chinese)
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1-12.  
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 1-12. (in Chinese)
- [16] 赵镇南. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 25-55.  
ZHAO Zhennan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 25-55. (in Chinese)