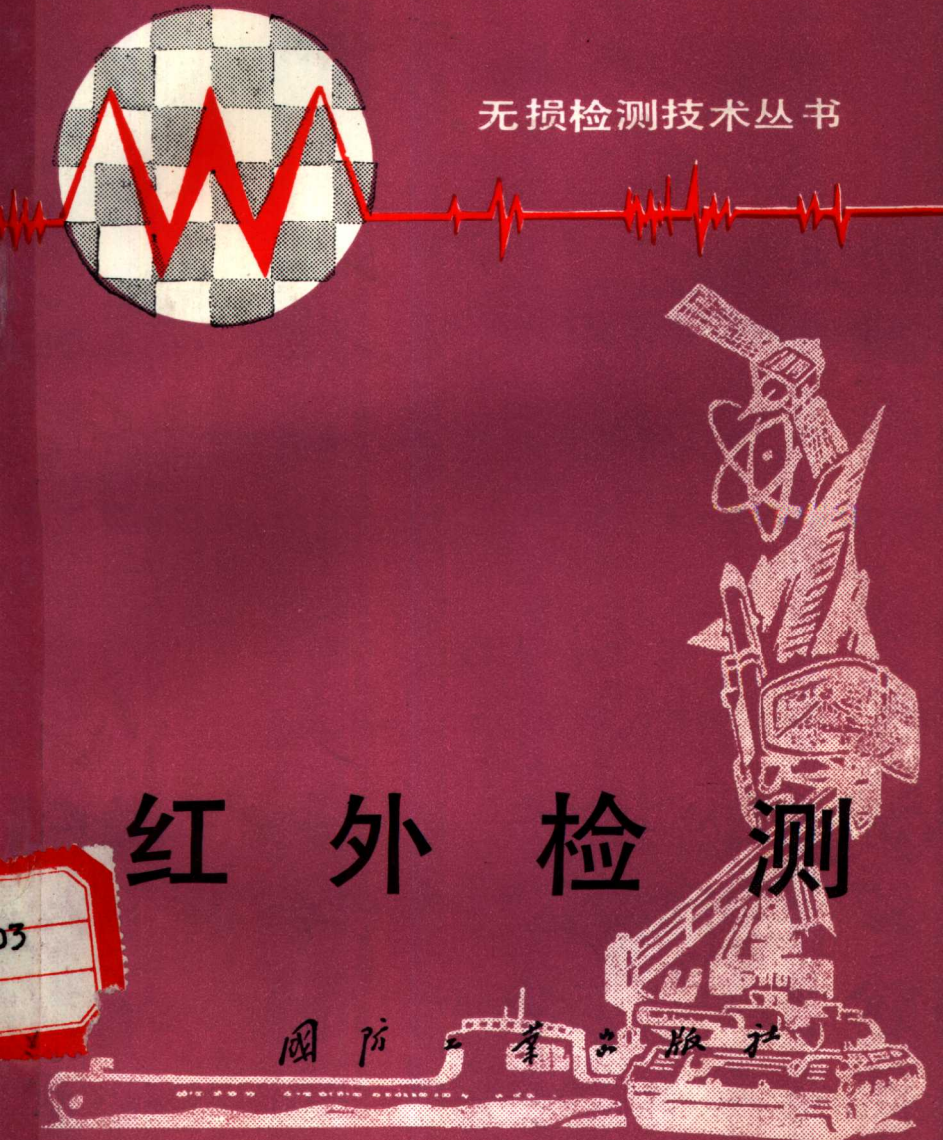


无损检测技术丛书

# 红外检测

国防工业出版社



无损检测技术丛书

# 红 外 检 测

王康印 编著

国防工业出版社

## 内 容 简 介

红外检测是六十年代发展起来的一种新的无损检测技术。它是利用红外辐射原理可以非接触、准确迅速、安全可靠地对试件进行检验和测量。本书简要地介绍红外检测的基础知识，包括检测原理、检测方法、仪器设备和应用实例等内容。书中图文并茂，文字通俗易懂，适合从事无损检测工作的工人和技术人员阅读，也可供有关专业技术人员参考。

无损检测技术丛书

红 外 检 测

王康印 编著

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092 1/32 印张 4 86千字

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷 印数：0,001—2,240册

统一书号：15034·3055 定价：0.86元

## 前 言

无损检测是一门新兴的综合性科学技术。它以不损坏被检对象的使用性能为前提，应用物理和化学知识，对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验和测试，借以评价它们的完整性、连续性和其它物理性能。无损检测是实现质量控制、保证产品安全可靠、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率的重要手段，目前已成为产品制造和使用中不可缺少的组成部分。

现代科学技术的发展，为无损检测提供了新的理论和物质基础。目前能够在生产中应用的已有五十多种检测方法，在一些领域还实现了由电子计算机控制的自动化检测。在我国四个现代化的进程中，无损检测技术的应用日益受到重视，并有着广阔的发展前景。

为普及、推广无损检测技术，我们编写了一套《无损检测技术丛书》。这套丛书有如下十一个分册：

- 超声检测；
- 射线检验；
- 磁粉检验；
- 涡流检测；
- 渗透检验；
- 声发射检测；
- 激光全息检验；
- 微波检测；
- 红外检测；

胶接结构与复合材料的无损检测；

无损检测自动化与信息处理。

编写这套丛书所选取的资料，一部分来自生产、科研实践；一部分是参阅了国内外有关的技术书刊。在编写过程中曾得到编写组各成员所在单位的大力支持。本分册的编写得到了王登弟、吴忠等同志的大力支持和帮助，贺潜源、陈名义、陈积懋同志审阅了书稿，特别是傅翔同志在书稿修定过程中给予审校，提出了宝贵意见及有关资料，刘长久、侯善敬同志提供了输变电网检测一节的部分图片，在此一并表示衷心感谢。

由于水平所限，书中缺点、错误在所难免，欢迎读者批评指正。

《无损检测技术丛书》编写组

一九八六年二月

# 目 录

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 红外检测的基础知识 .....       | 1   |
| 一、什么是红外检测 .....       | 1   |
| 二、红外检测的基本知识 .....     | 2   |
| 三、红外检测的基本原理 .....     | 6   |
| 四、红外检测的主要方法 .....     | 8   |
| 五、红外检测的特点 .....       | 11  |
| 红外检测仪器和设备 .....       | 12  |
| 一、红外检测仪器的主要组成部分 ..... | 12  |
| 二、红外测温仪 .....         | 27  |
| 三、红外辐射计 .....         | 40  |
| 四、红外热象仪 .....         | 42  |
| 五、红外显微镜 .....         | 52  |
| 六、辅助检测设备 .....        | 57  |
| 红外检测技术的应用 .....       | 59  |
| 一、航天器材的检测 .....       | 62  |
| 二、电子元、器件的检测 .....     | 82  |
| 三、机电动力设备的检测 .....     | 90  |
| 四、湿度与膜厚的检测 .....      | 103 |
| 五、气体分析与环境监测 .....     | 112 |
| 六、其他检测 .....          | 114 |
| 红外检测注意事项 .....        | 119 |
| 参考文献 .....            | 122 |

# 红外检测的基础知识

## 一、什么是红外检测

雷雨过后，天空中出现了美丽的彩虹。这是由于阳光被雨露散射，白色的太阳光被分成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的七色光带。我们把位于可见光红光外侧，肉眼看不见的光线叫做红外线。

红外线是研究太阳光谱的热量分布时发现的。1800年英国物理学家威·赫谢尔（W·Herschel）用灵敏的温度计在可见光谱红光以外的地方，发现有显著的热作用存在，后来用特殊的感光底片拍摄光谱，证实了在红光区域外侧的确有谱线存在。

红外线是一种电磁波，它的波长比红光更长，一般认为从0.75微米到1毫米。红外波段通常又分成“近红外”（0.75~3微米）、“中红外”（3~6微米）、“远红外”（6~15微米）和“极远红外”（15~1000微米）等四个较小的波段。

红外线遵循可见光所遵循的规律：直线传播、反射与折射等。太阳光的热主要是由红外线传播的，因此红外线这种不可见的辐射又称为热辐射。

红外辐射是由原子和分子的振动或转动引起的。实际上，自然界任何高于绝对零度的物体，无论是固体、液体或气体都是红外辐射源。每一种物体都随其温度和表面状态而有一定功率的辐射。

红外技术是研究和应用红外辐射的一门新兴科学技术。红外检测就是利用红外辐射原理对物体或材料表面进行检验

和测量的专门技术。

## 二、红外检测的基本知识

### 1. 黑体辐射

一个吸收所有碰撞它的任何波长的全部辐射的物体被定义为黑体。克希霍夫定律指出：一个物体吸收任何波长全部辐射的能力等于发射辐射的能力。黑体是个理想的物体。所谓黑体就是一个空腔，上面开有一个小孔，当空腔达到某一温度并处于热平衡时，从小孔射出的红外辐射就具有稳定的特性，称为黑体辐射。实际制造的黑体与理想中的黑体十分近似。

描述黑体辐射的三个表达式：

普朗克定律 普朗克用下述公式描述黑体辐射的光谱分布：

$$M_{\lambda,b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (1)$$

式中  $M_{\lambda,b}$ ——波长  $\lambda$  处单位光谱间隔内的黑体光谱辐出度  
(瓦/厘米<sup>2</sup>·微米)；

$c$ ——光速 =  $3 \times 10^{10}$  (厘米/秒)；

$h$ ——普朗克常数 =  $6.6 \times 10^{-24}$  (焦耳·秒)；

$k$ ——玻耳兹曼常数 =  $1.4 \times 10^{-23}$  (焦耳/K)；

$T$ ——黑体的绝对温度 (K)；

$\lambda$ ——波长 (微米)。

使用测量光谱辐射特性的仪器 (即光谱辐射计) 时，总是对一个窄带辐射进行测量，此时必须标明光谱间隔，否则光谱辐出度  $M_{\lambda,b}$  是没有意义的。普朗克公式对不同温度可以画出一组曲线。对任一普朗克曲线，光谱辐射在  $\lambda = 0$  处

为零，然后在  $\lambda_{\max}$  处增加至最大值，超过它后又在很长的波长处接近于零。温度愈高，最大值出现的波长愈短，见图 1。

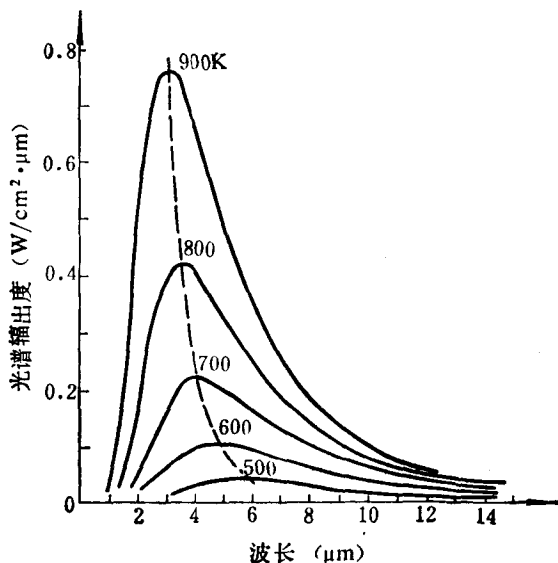


图 1 绝对黑体不同温度的光谱辐出度 (虚线表示由维恩位移定律描述的每一温度最大辐出度的轨迹)

**维恩位移定律** 普朗克公式对  $\lambda$  微分，找出最大值，可得：

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \text{ (微米)} \quad (2)$$

这是维恩公式，它用数学表达式解释了通常看到的当热辐射体温度增加时它的颜色由红色变成橙色或黄色这一现象。颜色的波长与计算的  $\lambda_{\max}$  相同。由此式可计算出室温 (300 K)

的辐出度峰值在 9.7 微米处。

斯蒂芬-玻耳兹曼定律 将普朗克公式由  $\lambda = 0$  到  $\lambda = \infty$  积分, 得到黑体的全部辐出度

$$M_b = \sigma T^4 \quad (\text{瓦/厘米}^2) \quad (3)$$

式中  $\sigma$  是斯蒂芬-玻耳兹曼常数  $= 5.67 \times 10^{-12} \text{瓦/厘米}^2 \cdot \text{K}^4$ 。这是斯蒂芬-玻耳兹曼公式, 它说明黑体的全部辐射功率正比于它的绝对温度的四次方。 $M_b$  代表一特定温度下普朗克曲线所包含的面积。可以证明,  $\lambda = 0$  至  $\lambda = \lambda_{\max}$  间的辐出度为全部辐射的 25%, 它表明太阳辐射在可见光范围内的数值。利用斯蒂芬-玻耳兹曼公式可计算人体辐射功率, 温度 300K, 表面积 2 米<sup>2</sup> 时, 大约为 1 千瓦。

## 2. 非黑体辐射体

真实物体几乎不可能在广阔的波长范围内遵守这些黑体辐射定律, 仅在一定的光谱间隔内可能接近黑体。

有三个过程使真实物体不能起到黑体的作用, 因为入射辐射的一部分  $\alpha$  可以被吸收, 一部分  $\rho$  可以被反射, 一部分  $\tau$  可以被透过。由于这些因素都与波长多少有关, 因此, 在定义它们时下角标注  $\lambda$ 。

设光谱吸收率  $\alpha_\lambda = \text{吸收光谱辐射与入射光谱辐射比值}$ ; 光谱反射率  $\rho_\lambda = \text{反射光谱辐射与入射光谱辐射比值}$ ; 光谱透过率  $\tau_\lambda = \text{透射光谱辐射与入射光谱辐射比值}$ 。

在任一波长, 这三部分的和必须等于全部的辐射, 因此可得:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (4)$$

对于不透明材料  $\tau_\lambda = 0$ , 上式简化为

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (5)$$

另一个因素, 称作发射率  $\varepsilon$ , 是描述在一特定温度下物

体的辐出度与黑体辐出度的比值。

光谱发射率  $\varepsilon_\lambda$  等于在某一温度和波长下，物体光谱辐射功率与黑体光谱辐射功率的比值。

通常有三类辐射源，区别在于各自的光谱发射率不同：

黑体  $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$ ；

灰体  $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = \text{小于} 1 \text{ 的常数}$ ；

选择辐射体  $\varepsilon_\lambda$  随波长改变。

按照克希霍夫定律，任何材料在任意温度和波长下物体的光谱发射率与光谱吸收率是相等的。即  $\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$ 。因此对不透明材料得：

$$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (6)$$

对于高抛光材料， $\varepsilon_\lambda$  接近于零，所以对完全反射材料得：

$$\rho_\lambda = 1 \quad (7)$$

对于灰体辐射体，斯蒂芬-玻耳兹曼公式变成：

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{瓦/厘米}^2) \quad (8)$$

这说明灰体的总辐出度等于同一温度黑体的总辐出度乘上灰体的  $\varepsilon$  值。由此公式可计算出单位面积温度为  $T$  的物体表面向半球空间发射的辐射功率。红外检测的目标通常都是当做灰体来处理的。 $\varepsilon$  通常随波长和温度而变化，同时还与辐射的表面状态（物理的、化学的）等因素有关。用热象仪获得的  $\varepsilon$  值是热象仪探测器敏感的红外波段内  $\varepsilon_\lambda$  的平均值。

金属的发射率低，并随温度的升高而缓慢增加。对于非金属，发射率比较高，并随温度的升高而降低。各种常用材料的典型发射率列在表 1 中。

表1 常用材料的发射率(室温)

| 材 料       | 发射率 $\varepsilon$       | 材 料     | 发射率 $\varepsilon$ |
|-----------|-------------------------|---------|-------------------|
| 抛光金       | 0.02                    | 灯 黑     | 0.95              |
| 抛光银       | 0.02                    | 各色油漆    | $\approx 0.94$    |
| 抛光铝       | 0.02~0.08               | 无光黑漆    | 0.96~0.98         |
| 铝(阳极化处理)  | 0.55                    | 各色油彩    | 0.92~0.96         |
| 抛光铜       | 0.02~0.22               | 涂在铁上的白漆 | (100°C)           |
| 氧化铜       | (50~350°C)<br>0.61~0.85 | 色 瓷 漆   | 0.91              |
| 铝涂层       | 0.55                    | 石 棉 纸   | 0.93~0.95         |
| 氧化铁       | 0.70                    | 白 纸     | 0.93              |
| 铸 铁       | 0.87~0.95               | 毛面红砖    | 0.93              |
| 钢(氧化的)    | 0.79                    | 混 凝 土   | 0.92              |
| 不锈钢(氧化的)  | 0.85                    | 饱和水的泥土  | 0.95              |
| 抛光铬       | 0.08~0.26               | 粗糙泥层    | 0.91              |
| 抛光铸铁      | (100~1000°C)<br>0.25    | 砂       | 0.90              |
| 铁 锈       | 0.85~0.95               | 水       | 0.95~0.96         |
| 抛光黄铜      | 0.60                    | 雪       | 0.85 (-10°C)      |
| 锡(工业马口铁板) | 0.07 (100°C)            | 木头      | 0.90              |
| 碳(表面抛光)   | 0.98                    | 人的皮肤    | 0.98              |
| 光滑玻璃      | 0.94                    | 上釉的瓷    | 0.92              |
| 有光泽镀锌铁皮   | 0.23                    | 粗墨涂层    | 0.90              |
|           |                         | 硬橡胶板    | 0.95              |

### 三、红外检测的基本原理

红外检测的理论是基于热辐射的普朗克定律。扫描记录或观察被测试件表面上的由于缺陷和材料不同的热特性引起的温度变化就是红外检测的物理基础。

由式(8)可知,当一个物体表面的发射率 $\varepsilon$ 不变时,该物体的辐射功率与其温度 $T$ 的四次方成比例。因此对物体辐射功率的探测,实际就成为对物体表面温度的探测。

当一个工件的几何尺寸、热物理特性参数、测量条件

(如加热、环境温度、边界条件等)、内部缺陷位置形态及热特性等确定后,可借助数学模型,计算出工件表面某一点温度变化,这样就可以从理论上说明红外检测的依据。这里我们不做繁琐的数学推导,只定性地阐述一下红外检测的原理。

将一固定热量 $q$ 加在工件表面时,热流均匀地注入工件表面,并扩散进入工件内部,其速度由内部性质决定。如果工件内部有缺陷(如脱粘)存在,则均匀热流就被缺陷阻挡(热阻),经过时间延迟在缺陷部位发生热量堆积,在其表面产生过热点,表现为温度异常。用红外仪器扫描工件表面,测量工件表面温度分布情况。当探测到过热点就可断定出现过热点的表面下方存在缺陷。用辐射计探测时,在记录纸上会出现一个正值尖峰曲线;用热象仪观察时,在荧光屏上会出现一个亮斑。使用这种方法可以探测胶接和焊接件中的脱粘或未焊透部位、固体材料中的裂纹、空洞、夹杂等缺陷。

热注入后出现最大温差所需的时间是一个很重要的量。根据加热时间和加热结束后测量温度之间的延迟时间可以控制热注入工件的深度。对于不同材料,不同深度的缺陷,延迟时间是不同的,一般由实验来确定。对于非金属材料或缺陷在深处的情况,较长时间的延迟可以在温度测量之前使得注入的热量穿入较深的部位,而对于金属或近表面缺陷,只需短时间延迟,就可进行温度测量。

红外检测缺陷的分辨率根据材料的热特性及结构而定。分辨缺陷的能力随着缺陷在材料内部深度的增加而减小。这是缺陷上方的材料把形成热点的热量扩散,从而使热梯度减小的缘故。对一般胶接结构,当缺陷的直径有所处深度的2~3倍时,则比较容易探测到。目前在不同条件下使用不

同仪器对于不同工件进行检测，都能相应地得出较高的灵敏度。一般情况下能探测  $10 \times 10$  毫米<sup>2</sup>、 $5 \times 5$  毫米<sup>2</sup>，甚至比  $2.5 \times 2.5$  毫米<sup>2</sup> 更小的脱粘缺陷。热流的阻挡只要很薄的一层就会起作用，缺陷垂直方向的尺寸一般在  $0.05 \sim 0.5$  毫米即可起作用，甚至可以发现未涂胶“紧贴型”的缺陷，这种缺陷在层状和蜂窝结构中经常出现。这种方法不受被检件结构的限制，只要缺陷能够影响热流通过就能探测到。

重要的是根据材料性质和具体情况选择适当的热注入方式。一般是采用非接触方法注入热量和探测表面温度。如将工件恒温后，把它放入一个低于（或高于）工件恒温温度值的环境中检验，若工件中存在有脱粘、裂纹、空洞等缺陷，则内部的热流在向外流动时因受到缺陷的阻挡，在表面就会出现一个温度较低的点，同没有缺陷的部位相比较，建立了温度梯度，用红外仪器扫描工件表面，就能探测到缺陷，记录纸上就会出现一个负的尖峰曲线，或在热象仪荧光屏上出现一个相应的暗影。

#### 四、红外检测的主要方法

红外检测按其检测方式可分为两大类：主动式和被动式。主动式检测是在人工加热工件的同时或在加热后，经过一段时间延迟后扫描记录或观察工件表面的温度分布。被动式检测则是利用工件自身的温度不同于周围环境的温度，在待测工件和周围环境的热交换过程中可显示出工件内部的缺陷，多用于运行中的设备的质量控制。

主动式检测又分为单面法和双面法。单面法是指加热和探测在工件的同一面进行，用辐射计或热象仪扫描记录加热后的产品表面温度分布。双面法是先在工件的一个表面进行

加热，而在其背面（另一个表面）进行观察或记录温度分布，见表2。

表2 红外检测方法分类

| 检测方法 |     | 检测特点                                       |
|------|-----|--------------------------------------------|
| 主动式  | 单面法 | 能够确定缺陷所处的深度                                |
|      | 双面法 | 能给出高的缺陷显示度                                 |
| 被动式  |     | 利用检查目标自身温度的热辐射，不需加热源，多用于运行中的设备、工件、电子元器件的检测 |

根据显示方式不同，红外检测还可分为：以扫描原理为基础或是利用辐射的多元探测器的热场观察法（热图法）；用热辐射探测器扫描工件得到温度分布曲线法（热轮廓线法）及逐点测温法。

按加热状态可分成稳态和非稳态。稳态是将待测工件加热到内部温度均匀恒定状态。例如用恒温箱可将待测工件恒温加热到任意选定的温度；使用外部热源将工件在自然环境中加热到某一稳定温度。非稳态是指加热时，工件内部的温度不是均匀恒定的，工件内部有热传导存在。通常使用的主动式单面法、双面法检查都是在非稳态下进行的。

理论和实验研究均已证明：稳态发现缺陷的条件因受被称作温差“模糊”效应的影响，使得工件表面温度梯度值较小。第一，这是由于沿工件中缺陷周围层的热流损失引起；其次，是由于把工件表面温度拉到环境温度或相应的由公式

$$T \approx q / \alpha \quad (\text{对半边界环境}) \quad (9)$$

$$T \approx q / 2\alpha \quad (\text{对薄板}) \quad (10)$$

确定的某一温度值引起的。

式中  $q$ ——外部加热热量；

$\alpha$ ——工件和环境的热交换系数。

因此，为了显示小缺陷，非稳态最合适。这时由于经过工件在热交换方向的热流动较之垂直于它的热流占优势，当选择最有利的加热参数时，得到的表面温度梯度将高于稳态的梯度。设缺陷上面层的厚度为  $d$ ，缺陷张开的宽度为  $l$ ，则缺陷的显示度与因子  $l/d$  有着密切的关系，凡是符合条件

$$l \geq kd$$

的所有缺陷都能很好的显示，式中  $k$  为常数，在稳态下为 10~12，在非稳态下为 2。于是，对不太大的空洞和裂纹缺陷的显示，稳态法是不大适用的；但在诊断高于（或低于）正常温度的潜伏热源方面，例如在检查电子仪器的零部件，在医学和地质学等领域中它却得到广泛的应用。

实际使用时，应根据工件的具体形状、材料、结构、检测条件和要求综合考虑，选择合适的方法。检测实践证明：双面法对缺陷的显示比较有效。当能从两边接近工件，记录的一面在 1~3 分钟内温度变化  $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ ，而加热的一面温度不超过允许值时，才能采用这种方法。用高灵敏度热象仪主动式双面法检查外层是非金属材料的多层结构时，显示缺陷的最小尺寸接近  $(0.9\sim 1.5)d$ ；检查外层是金属的多层结构时，显示缺陷的最小尺寸接近  $(3\sim 5)d$ ，并且必须在较短的时间间隔内观察缺陷的显示度。当检查由相同厚度组成的两层工件时，采用双面法检查，由导热性较好的一面加热工件，同时在导热性较差的一面观察或记录温度分布较为有效。

对于只能从一边接近工件的情况下，采用单面法可以由选择关掉热源后缺陷显示的最好时刻（此时温差最大）来确

定缺陷所处的深度，并保证更有效地发现深处的缺陷。单面法检测时，通常在加热结束后 5~200 秒进行扫描，记录温度分布或观察热图，具体时间间隔由工件厚度和缺陷所处位置深浅及工件热物理特性决定。

同双面法检查一样，在一定的加热时间（40 秒到 5 分钟，与工件种类有关）和延迟时间（加热结束时刻与记录热图时刻之间的时间间隔）的情况下，用单面法也能观察到最好的缺陷显示度。当工件必须单面检查时，最好从导热性较差的一面进行。

## 五、红外检测的特点

红外检测技术的广泛应用是与它的许多优点分不开的。它具有以下几个特点：非接触测量，不与被测物体接触，不破坏温度场；精度高，在一定条件下能分辨  $0.01^{\circ}\text{C}$  的温度差；空间分辨率高，可测小目标，用红外显微镜可测  $\phi 7.5$  微米的目标温度；反应快，可以在几毫秒内测出目标温度；检测时操作简便、安全可靠、易于实现自动化和“实时”观测；检测在许多情况下是被动的；检测距离可近可远，近者几毫米，远者可装在卫星上测量地表温度，也可在地球上测量月球表面温度；测量范围广，从  $-170\sim+3200^{\circ}\text{C}$ ；显示记录方式多样、形象直观、判读容易；能显示缺陷大小、形状和缺陷深度；与表面光洁度的关系小；检查仪器除热象仪价格较贵外，一般比较简单、价廉。在对非金属材料 and 多层胶接结构及复合材料的检测更能显示出它的特点，采用主动式检查，可实现非接触大面积快速有效的扫描检查，以很高的分辨率查出工件内部的脱粘、分层、夹杂等缺陷，形象地显示出缺陷的大小和形状，并可获得永久记录。