



中华人民共和国国家标准

GB/T 43413—2023/ISO 22290:2020

无损检测 红外热成像检测 热弹性应力 测量方法通则

Non-destructive testing—Infrared thermographic testing—General principles for
thermoelastic stress measuring method

(ISO 22290:2020, IDT)

2023-11-27 发布

2024-03-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 红外热成像检测人员	1
5 检测环境	1
6 检测设备	2
7 检测方法	3
8 检测的实施和报告	5
参考文献.....	7

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》规定起草。

本文件等同采用 ISO 22290:2020《无损检测 红外热成像检测 热弹性应力测量方法通则》。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本文件起草单位：华东理工大学、上海材料研究所有限公司、云南电网有限责任公司昆明供电局、清华大学深圳国际研究生院、重庆大学、广州广华智电科技有限公司、哈尔滨工业大学、西安邮电大学、东莞市鑫泰仪器仪表有限公司。

本文件主要起草人：轩福贞、蒋建生、项延训、韩丽娜、刘立帅、黄隐、丁杰、郭晨鋈、王黎明、梅红伟、成立、赵晨龙、涂彦昕、刘俊岩、王飞、宋爱玲、王先芝、罗国栋。

引 言

热弹性应力测量方法利用材料的热弹性效应对材料和结构的表面应力分布进行测量,是一种“全场”“非接触”测量技术。与应变计方法等传统技术不同,该方法的独特优势在于它能轻松地对试样整个表面应力分布($\Delta(\sigma_1 + \sigma_2)$)进行成像(见 ISO 10878)。

随着热成像技术的发展,热弹性应力测量方法的工业应用越来越广泛。热弹性应力测量方法应用的有效性取决于该方法的正确使用。本文件的制定旨在确立热弹性应力测量方法的总体原则,以促进该方法正确有效地应用于汽车、航空航天、电子仪器、医疗器械、工业材料等各种工业领域的无损检测。

无损检测 红外热成像检测 热弹性应力 测量方法通则

1 范围

本文件确立了工业无损检测领域红外热成像检测热弹性应力测量方法的通则。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 9712 无损检测 无损检测人员的资格与认证(Non-destructive testing—Qualification and certification of NDT personnel)

注: GB/T 9445—2015 无损检测 人员资格鉴定与认证(ISO 9712:2012, IDT)

ISO 10878 无损检测 红外热成像 术语(Non-destructive testing—Infrared thermography—Vocabulary)

注: GB/T 12604.9—2021 无损检测 术语 红外热成像(ISO 10878:2013, MOD)

ISO 10880 无损检测 红外热成像检测 总则(Non-destructive testing—Infrared thermographic testing—General principles)

ISO/TS 25107 无损检测 无损检测培训大纲(Non-destructive testing—NDT training syllabuses)

注: GB/Z 43414—2023 无损检测 无损检测培训大纲(ISO/TS 25107:2019, IDT)

3 术语和定义

ISO 10878 界定的术语和定义适用于本文件。

4 红外热成像检测人员

包括热弹性应力测量在内的红外热成像检测(TT)的人员应遵守以下要求:

- a) TT 人员应具备充分的检测知识,包括按照 ISO 9712 和 ISO/TS 25107 确定的热成像检测和传热工程的基础知识;
- b) TT 人员的视力和辨色能力应符合 ISO 9712 的规定。

5 检测环境

5.1 检测设备环境

在温度、湿度和气压适合检测设备(包括符合 ISO 10880 规定的红外热像仪)工作的环境中进行检测。避免被测对象表面结露。

为避免因视场抖动而出现图像模糊,尽量避免红外热像仪振动。当红外热像仪的振动周期与被测对象的加载周期同步时,能通过位置校正技术减少影响。

5.2 干扰规避

干扰规避的相关要求和信息符合 ISO 10880 中的规定。

此外,宜尽量减少被测对象除了基于热弹性效应之外的表面温度变化。例如,尽可能避风以避免气流引起的温度变化。

6 检测设备

6.1 配置

检测设备配置见图 1。

除了红外热像仪(见图 1 中标引序号 3)外,检测设备还包括用于红外热像仪控制、参考信号处理、图像处理、图像显示等的计算机(见图 1 中标引序号 7)。

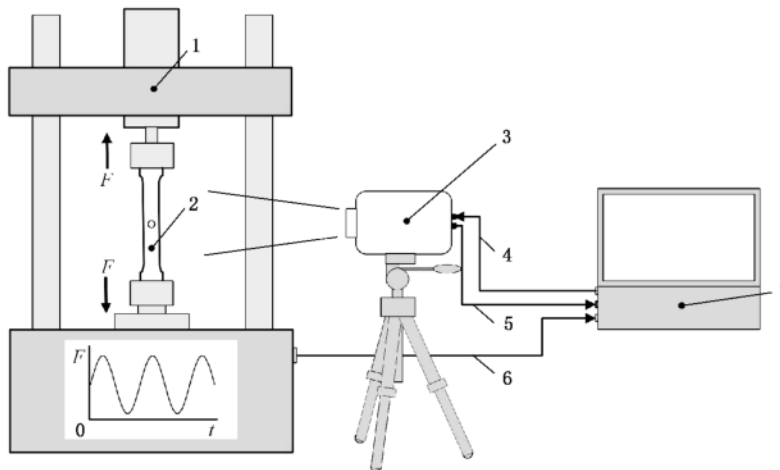
当对被测对象施加循环载荷时,材料试验机(见图 1 中标引序号 1)应具备按所需波形和频率加载的能力。

6.2 红外热像仪

红外热像仪应符合 ISO 10880 的规定。此外,红外热像仪的红外测量波长范围宜为 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 或 $8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$,以测量极小的温度变化。红外热像仪的帧频应在每个加载周期提供足够的帧数。为获得检测所需的空間分辨力,应适当设置红外热像仪的镜头视角、有效像素数以及与被测对象的距离。

宜使用具备适当温度分辨力的红外热像仪,以获得所需的应力(表面主应力之和)分辨力。

注:对于钢,获得 1 MPa 的应力分辨率需要约 0.001 K 的温度分辨率。通常,温度分辨率能通过图像平均等图像处理来提高,以及使用具有大约 0.03 K 噪声等效温度差(NETD)的红外热像仪。



标引序号说明:

- 1 —— 材料试验机;
- 2 —— 被测对象;
- 3 —— 红外热像仪;
- 4 —— 传送至红外热像仪的控制信号;
- 5 —— 来自红外热像仪的检测信号;
- 6 —— 来自材料试验机的参考载荷或位移信号;
- 7 —— 带有信号处理单元和显示器的计算机;
- F —— 载荷;
- t —— 时间。

图 1 检测设备配置图

6.3 基于热弹性效应的温度变化检测

使用“温差成像技术”“锁相技术”或其他等效信号处理方法从温度时间序列中提取热弹性效应引起的温度变化量。

与被测对象的应力变化同步的参考信号用于执行信号处理。参考信号应使用来自材料试验机的载荷或位移信号(见图1中标引序号6),或从被测对象上安装的应变计获得的信号。

注:温差成像技术是一种获取主应力之和变化图像的信号处理方法,包括测量最高温度时段和最低温度时段的温度分布图像,并绘制一个整体的“温度范围图像”,见ISO 10878。锁相技术具备在极其嘈杂的环境中提取已知载波信号的能力。该信号包括但不限于温度。

7 检测方法

7.1 被测对象

被测对象宜由被视为均质各向同性线弹性体的材料制成。

被测对象的发射率应符合ISO 10880的规定。被测对象的表面发射率宜均匀并接近黑体的发射率1.0。为此,能在材料表面均匀地涂覆发射率大于0.95的黑色哑光涂料薄层。使用黑色哑光涂料还能减少其他红外辐射源在被测对象表面的反射,从而有效提高检测精度。

当被测对象的加载频率较高和/或涂层较厚时,宜注意涂层表面的温度变化不等同于被测对象表面的温度变化。

在检测聚合物时,通过用砂纸进行均匀的表面处理获得与黑色哑光涂层基本相同的效果。

注1:发射率因红外线的波长和涂料的规格而异。

注2:黑色哑光涂层的最佳厚度为 $20\ \mu\text{m}\sim 30\ \mu\text{m}$ 。通常,使用气溶胶喷雾在被测对象上均匀喷涂2次黑色哑光涂料,在 $5\ \text{Hz}\sim 30\ \text{Hz}$ 的加载频率下的检测结果不受影响。

7.2 加载条件

7.2.1 加载条件通则

将被测对象适当地固定在试验机上后,应对其施加平均值、幅值和频率恒定的正弦循环载荷。加载时,应使用合适的支撑装置和加载装置,使被测对象上各点的主应力之和与载荷成比例变化。如果该条件难以实现,则评估检测结果应计及被测对象的主应力之和的不随载荷成比例变化。

示例:在2个物体接触的情况下,接触面积的大小通常根据载荷的大小而变化。当接触面积的大小发生变化时,接触区域附近主应力之和的变化与载荷的变化不成正比。

7.2.2 载荷平均值和幅值

宜通过设置恒定加载频率的同时改变载荷平均值和幅值进行初步测量。然后,在随载荷幅值变化的温度归一化值基本恒定的范围内选择载荷平均值和幅值。

载荷平均值和幅值宜在考虑以下a)~c)项后适当设置。

- 设定最小载荷(平均值减去幅值得到的载荷)和最大载荷(平均值加上幅值得到的载荷),以避免被测对象的任何部分出现明显的屈服、屈曲或破坏。如果被测对象的一部分不可避免地发生屈服、屈曲或破坏,则宜考虑这些因素再评估测量结果。
- 载荷幅值设置足够大,以便能以足够高的分辨率和准确度测量由热弹性效应引起的温度变化。
- 载荷幅值设置足够小,使最小载荷和最大载荷下被测对象在测量区域中的位移(刚体位移和/或变形)的差异不至于过大。如果位移太大以至于无法忽略,使用适当的运动补偿技术。在这种情况下,宜在评估测量结果时注意运动补偿技术的适用范围。

7.2.3 加载频率

保持恒定的载荷平均值和幅值,改变加载频率来进行初步测量,选择加载频率使测量温度的变化范围和/或相对于加载频率的相位变化最小,从而确定合适的加载频率。

加载频率宜在考虑以下 a)~c)项后适当设置。

a) 加载频率设置足够大,使被测对象的热传导对温度分布的影响最小,被测对象处于近绝热状态。

注 1: 线弹性体处于绝热状态时,主应力之和与温度的相位差为 180°(压缩时为 0°)。相位相差高达 180°意味着能粗略估计被测对象的热传导对温度分布的影响程度。

注 2: 热传导对被测对象温度分布的影响程度与加载频率成反比,与被测对象材料的导热系数(热扩散率)成正比。

注 3: 如果整个被测对象的主应力之和的变化是均匀的,则由于热弹性效应引起的温度变化也变得均匀,从而能忽略热传导。

b) 设置加载频率值,使得红外热像仪在每个加载周期提供足够的帧数。

c) 如果被测对象表面涂有防腐涂料,则将加载频率设置为与涂层类别和厚度相对应的值。

注 4: 如果涂层较厚,随着加载频率的增加,涂层表面的温度变化很难等同于被测对象表面的温度变化。

7.3 成像方法

成像方法应符合 ISO 10880 的规定。另外,根据应力测量视场所需的分辨率设置被测对象与红外热像仪的距离。

被测对象表面与红外热像仪应接近正对。同时,避免被测对象表面反射红外热像仪本身的影像。

如果被测对象表面的法线与红外热像仪光轴的夹角大于 45°,则从被测物表面发射到红外热像仪的红外辐射会随着夹角的增大而逐渐下降,大于 60°则急剧下降。因此,测量夹角设置在 45°以内,最大不应大于 60°。红外反射镜能用于测量夹角大于 60°或测量被测对象的背面,但宜考虑镜面反射率对测量精度的影响。

7.4 应力值校准

在绝热条件下,被测对象主应力之和的变化与热弹性效应引起的温度变化之间的关系见公式(1):

$$\Delta\sigma = -\frac{\Delta T}{k_1 T} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$\Delta\sigma$ ——主应力之和的变化,单位为帕斯卡(Pa);

ΔT ——温度变化,单位为开尔文(K);

T ——被测对象温度,单位为开尔文(K);

k_1 ——热弹性系数,单位为每帕斯卡(Pa⁻¹)。

其中, $k_1 = \frac{\alpha_1}{\rho C_p}$

式中:

α_1 ——线性热膨胀系数,单位为每开尔文(K⁻¹);

ρ ——材料密度,单位为千克每立方米(kg/m³);

C_p ——定压比热容,单位为焦耳每千克开尔文[J/(kg·K)]。

根据公式(1),被测对象表面的温度变化(ΔT)换算为表面主应力之和的变化 $\Delta\sigma[\Delta(\sigma_1 + \sigma_2)]$ 。

然而,通过红外热成像进行温度测量的方法很难准确估计所有参数,例如,被测对象表面的实际发射率以及由于被测对象与红外热像仪之间的红外吸收/散射所造成的任何影响。采用应变片法在被测对象应力分布的平坦位置测量主应力之和的变化,同时使用红外热成像测量视在温度变化,以获得校准

系数(β),见公式(2)。

$$\Delta\sigma' = -\frac{\beta\Delta T'}{k_1 T} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

$\Delta\sigma'$ ——主应力之和变化的标定值,单位为帕斯卡(Pa);

β ——校准系数;

$\Delta T'$ ——视在温度变化,单位为开尔文(K)。

注:实际的热弹性应力测量设备通常显示温度的变化和主应力之和的变化(全振幅)。然而,有时可能显示的是幅值(半振幅),因此注意所使用的测量设备。

8 检测的实施和报告

8.1 无损检测工艺流程

应编制书面无损检测工艺流程,以提供检测和被测对象的有关信息。检测工艺流程应包括但不限于以下内容:

- a) 检测目的;
- b) 适用范围;
- c) 适用标准;
- d) 检测人员;
- e) 被测对象和检测区域;
- f) 检测设备;
- g) 检测环境;
- h) 检测方法和检测条件;
- i) 评估方法;
- j) 记录和报告。

8.2 无损检测作业指导书

应编制书面无损检测作业指导书。无损检测作业指导书应包括但不限于以下内容:

- a) 检测日期、时间和地点;
- b) 检测区域;
- c) 检测设备,包括红外热像仪[样式、型号、镜头、使用的光学系统(如红外反射镜)等]、材料试验机(样式、型号、加载方式等);
- d) 检测方法和检测条件,包括热弹性应力测量方法、红外热像仪的参数设置、被测对象的加载条件(如波形、频率、最小载荷、最大载荷)、信号处理方法(如锁相技术)、被测对象表面处理方法、环境干扰因素等;
- e) 记录方法。

8.3 检测条件记录

红外热成像检测的结果因检测环境、检测设备和检测条件而异。应记录影响结果的任何条件。

- a) 检测日期、时间和地点。
- b) 检测人员。
- c) 被测对象和待测区域,包括被测对象的形状、尺寸、材质、表面纹理,红外热像仪与被测对象的距离、被测对象的可见光视觉图像等。

- d) 检测设备[红外热像仪的样式及型号(检测元件、有效像素数)、光学系统(镜头、滤光片和红外反射镜)、温度范围、曝光时间、帧频;材料试验机的样式及型号(加载方式、最大加载载荷、最大加载频率、最大位移容限)等]。
- e) 检测环境(温度、湿度、红外热像仪与被测对象之间的位置关系以及任何影响结果的环境因素)。
- f) 检测方法和检测条件:
 - 表面处理提高发射率的方法;
 - 载荷波形、频率、最小载荷、最大载荷等热弹性应力测量方法的试验条件;
 - 采用的信号处理和图像处理方法,如温差成像技术或锁相技术。
- g) 评估方法(根据获得的指示,将相关数据评估为属于异常应力产生点的原因)。

8.4 报告

根据具体需要,报告列出无损检测工艺规程和无损检测作业指导书中的部分条目。

参 考 文 献

- [1] ISO 18251-1, Non-destructive testing—Infrared thermography—Part 1: Characteristics of system and equipment
- [2] NASA/TM-1999-209376, Thermoelastic stress analysis; the mean stress effect in metallic alloys, Gyekenyesi, A L. and Baaklini, G Y., National Aeronautics and Space Administration (1999)
- [3] NDIS 3425, Thermoelastic stress measuring method
- [4] ASTM E1934, Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography
- [5] DIN 54190-1, Non-destructive testing—Thermographic testing—Part 1: General principles
- [6] On the dynamical theory of heat, with numerical results deduced from Mr. Joule's equivalent of a thermal unit, and Mr. Regnault's observations on steam, Thomson, W., Transactions of the Royal Society of Edinburgh, vol. 20 (1853), pp. 261-288
- [7] On the Thermoelastic, Thermomagnetic and Pyro-electric Properties of Matter, Thomson, W., The London and Edinburgh Philosophical Magazine and J. of Sci., series. 5, vol. 5 (1878) pp. 4-27
- [8] Thermoelastic Stress Analysis, Harwood, N. and Cummings, W.M eds. (1991) Adam Hilger
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
无损检测 红外热成像检测 热弹性应力
测量方法通则

GB/T 43413—2023/ISO 22290:2020

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址:www.spc.net.cn

服务热线:400-168-0010

2023年11月第一版

*

书号:155066·1-74402

版权专有 侵权必究



GB/T 43413-2023