

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 47013.16—××××

5

承压设备无损检测 第 16 部分：红外热成像检测

Nondestructive testing of pressure equipments—
Part 16: Infrared thermographic testing

（征求意见稿）

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家能源局 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 方法概述	1
5 一般要求	1
6 检测	3
7 结果评价	4
8 记录和报告	4
附录 A（规范性附录）承压设备泄漏红外热成像检测和结果评定	5
附录 B（规范性附录）承压设备内衬破损、结焦红外热成像检测和结果评定	7
附录 C（规范性附录）气瓶复合材料层红外热成像检测和结果评定	9
附录 D（规范性附录）承压设备保温层破损红外热成像检测和结果评定	12

前 言

本文件按 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》的规定起草。

本文件为 NB/T 47013《承压设备 无损检测》的第16部分。NB/T 47013 已经发布了以下部分：NB/T 47013《承压设备无损检测》分为以下16个部分：

- 第1部分：通用要求；
- 第2部分：射线检测；
- 第3部分：超声检测；
- 第4部分：磁粉检测；
- 第5部分：渗透检测；
- 第6部分：涡流检测；
- 第7部分：目视检测；
- 第8部分：泄漏检测；
- 第9部分：声发射检测；
- 第10部分：衍射时差法超声检测；
- 第11部分：射线数字成像检测；
- 第12部分：漏磁检测；
- 第13部分：脉冲涡流检测；
- 第14部分：射线计算机辅助成像检测；
- 第15部分：相控阵超声检测；
- 第16部分：红外热成像检测。

本文件由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件所代替文件的历次版本发布情况为：

- 202X年首次发布为《承压设备无损检测 第16部分：红外热成像检测》。

引 言

高于绝对零度的物体都会产生热辐射，其表面辐射强度与物体表面发射率、温度等有关，一般情况下辐射主要集中在红外波段。红外无损检测可分为主动式和被动式红外热成像检测两种。主动式红外热成像检测技术通过加热（或冷却）材料以产生需要的热流和温度梯度，在主动检测中通常应用瞬态热流。主动检测的常见的激励方式有闪光灯、卤素灯、电磁感应、超声（振动）、热水等。被动式红外热成像检测技术应用于材料内部已存在热源的情况，因此稳态热流条件适用于被动检测技术。

承压设备无损检测

第 16 部分：红外热成像检测

1 范围

- 1.1 NB/T 47013 的本部分规定了承压设备采用红外热成像技术检测的方法和质量分级要求。
- 1.2 本部分适用于承压类设备的损伤、保温层破损、结焦以及泄漏的红外检测和结果评定。

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。

GB/T 12604.9 无损检测 术语 红外热成像

GB/T 38238 无损检测仪器 红外线热成像 系统与设备性能描述

NB/T 47013.1 承压设备无损检测 第 1 部分：通用要求

3 术语和定义

GB/T12064.9 和 NB/T 47013.1 界定的术语和定义适用于本部分。

4 方法概述

4.1 基本理论

高于绝对零度的物体都会产生热辐射，其表面辐射强度与物体表面发射率、温度等有关，一般情况下辐射主要集中在红外波段。

在实际应用中，根据大气窗口，波长可进一步细分为近红外（0.75~1.9 μm）、中波红外（3.0~5.0 μm）和长波红外（7.0~14.0 μm）三个波段。

在红外热成像检测中通常获取中波红外或长波红外波段的红外辐射信号。

4.2 技术方法

红外无损检测可分为主动式和被动式红外热成像检测两种。

主动式红外热成像检测技术通过加热（或冷却）材料以产生需要的热流和温度梯度，在主动检测中通常应用瞬态热流。主动检测的常见的激励方式有闪光灯、卤素灯、电磁感应、超声（振动）、热水等。

被动式红外热成像检测技术应用于材料内部已存在热源的情况，因此稳态热流条件适用于被动检测技术。

5 一般要求

5.1 检测人员

5.1.1 从事红外热成像检测的人员应按 NB/T 47013.1 的要求或有关主管部门规定取得相关无损检测人员资格鉴定机构颁发或认可的红外热成像检测资格等级证书，从事相应资格等级规定的检测工作。

5.1.2 红外热成像检测人员应熟悉被测设备，具有一定的红外热成像相关知识，对检测中出现的问题能做出分析、判断和处理。

5.2 检测系统与器材

5.2.1 红外热像仪

5.2.1.1 测温一致性：不高于 2%；

5.2.1.2 最小可辨温差（MRTD）：

1) 制冷型机芯探测器红外热像仪所处环境为 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 时，在其特征频率下的最大 MRTD 值应不大于 0.4K；

2) 非制冷型机芯探测器红外热像仪所处环境为 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 时，在其特征频率下的最大 MRTD 值应不大于 0.8K；

5.2.1.3 测温准确性：当所处环境为 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 时，测温的最大允许误差应不超过 $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 或被测温度的 $\pm 2\%$ （取绝对值大者）；

5.2.1.4 采样帧频：不低于 10 帧/s；

5.2.1.5 空间分辨力： $\leq 1.5\text{mrad}$ ；

5.2.1.6 最大测温范围：与被测设备工作温度相适应，校准一般不少于每半年一次；

5.2.1.7 设备测试和性能评价应参考 GB/T 38238 中的相关规定执行。

5.2.2 设备校准

5.2.2.1 红外热成像装置应在校准周期内；

5.3 被检试件要求

1) 应保持被检设备表面干燥、无油污，并尽可能提高表面红外发射率；

2) 条件允许时应使用可清洗涂料增强材料表面发射率；

3) 检测过程中应避免其他热辐射源（如：太阳）辐射到被检对象表面；

4) 被检对象表面不应有遮挡物，实施检测前应拆除。

5.4 检测环境要求

1) 应减少检测区域内空气扰动造成的对流等对受检材料的影响；

2) 应避免阳光或其他辐射源的直接照射或反射进入仪器镜头；

3) 应保证环境温度在整个检测过程中相对稳定；

4) 应尽可能降低环境湿度，减少环境湿度对检测的影响；

5) 应保证检测环境的安全；

6) 应尽量减少其他物体同被检材料的接触，以降低由于被检材料同其他物体之间的热传导造成的干扰；

7) 应采用仪器镜头正对被检对象表面方式进行检测。

5.5 安全要求

本章没有列出实施时所有的安全要求，使用本标准的用户应在实施前建立安全准则，检测场所、环境及安全防护应符合 NB/T47013.1 有关要求。

实施过程中的安全要求至少如下：

1) 检测人员应遵守承压设备现场运行的安全要求，根据检测地点的要求穿戴防护工作服和佩戴有关防护设备；

2) 对设备进行检测时, 红外检测人员应遵守甲方要求的一切安全准则、规定程序和措施;

3) 应注意被检测设备的温度状态, 以免烫伤;

4) 协助人员应获得对检测相应设备必要的授权, 并将检测活动上报给管理人员, 做好设备运行对接工作。

5.6 检测工艺流程

5.6.1 应按照 NB/T47013.1 的要求制定红外热成像检测工艺流程, 工艺流程应至少包括如下内容:

- a. 适用范围;
- b. 引用法规、标准;
- c. 检测人员资格;
- d. 检测仪器;
- e. 被检设备(部件)信息;
- f. 检测覆盖范围;
- g. 检测过程 and 数据分析;
- h. 检测结果的评定;
- i. 检测记录、报告和资料存档;
- j. 编制、审核和批准人员;
- k. 编制日期。

5.6.2 工艺流程应经验证, 当各附录中规定的重要因素或其他对检测灵敏度有严重影响的因素发生变化时, 工艺流程应重新验证。.....

6 检测

6.1 检测前准备

6.1.1 设备管理单位应提供一名熟悉被检设备操作和历史状况的人员协助红外检测人员;

6.1.2 红外检测人员应在协助人员的协助下制定合理、有效、安全的待检设备清单;

6.1.3 红外检测人员在红外定量检测之前应对设备进行校准, 以确保所有温度测量装置在仪器制造商给出的标准精度之内, 并符合 5.2 要求;

6.1.4 每次主动检测开始前, 应选择同被检对象同一材质或者材质接近的带缺陷试样进行测试, 保证检测的灵敏度;

6.1.5 红外检测人员应在环境和物理条件(如: 日照、风、表面和环境湿度、热传递等)许可时进行检测;

6.1.6 在检测前应确定检测工艺, 包括:

- 1) 检测对象: 承压设备类别、检测对象名称、材质、壁厚、检测部位等;
- 2) 检测技术要求: 检测方法(主动式或被动式)选取、激励加载程序;
- 3) 检测的时机或者激励时长和激励方式等。

6.1.7 评估被检测对象表面发射率应满足检测最低要求。

注: 当被测物体表面热辐射系数较低(<0.5)时应特别注意。在此情形下可能很难被发现异常。同时, 这样的表面反射的红外线可能也会被误读。红外检测人员应意识到这些潜在的误差并采取合适的方法使之最小化(如: 移动热像仪的位置, 回避红外线反射较强的角度)。

6.2 检测

6.2.1 参数设置

1) 为确保检测结果的准确性, 应根据需要输入检测区域表面反射率、镜头到被检测区域的距离、环境温度、湿度等信息;

2) 应根据镜头焦距、被检测区域面积大小等, 调整检测距离、焦距并对焦, 获得清晰稳定的红外热像图。

6.2.2 检测覆盖

1) 应尽可能将被检测对象全部纳入热像仪视场中;

2) 不能完整纳入视场时, 可将被检测对象划分成多个区域, 分别检测, 并标记好不同热像图对应的区域。

6.2.3 根据需要施加合适的检测激励。

6.2.4 具体检测要求见本部分相应的附录。

7 结果评价

7.1 除另有规定外, 应采用每种检测方法或技术所规定的验收标准。

7.2 当甲方要求时, 红外检测人员应在缺陷修理后重新检测每一处异常, 以确保工作温度正常、潜在缺陷被修复。

8 记录和报告

8.1 记录

应按检测工艺规程的要求记录检测数据或信息, 并按照相关法规、标准和(或)合同要求保存所有记录。

8.2 报告

检测报告应至少包括如下内容:

- a. 委托单位;
- b. 检测日期;
- c. 工艺规程编号和版本;
- d. 被检件的名称、编号、规格、材质等;
- e. 采用的方法或技术;
- f. 检测方法或技术方案的示意图(必要时);
- g. 检测仪器、标准试件(必要时);
- h. 外加激励源和激励参数(必要时);
- i. 检测数据;
- j. 检测结果;
- k. 检测人员、报告编写人和审核人签字及资格证书编号;
- l. 检测日期。

附录 A (规范性附录)

承压设备泄漏红外热成像检测和结果评定

A.1 概述

A.1.1 原理

由于介质自身温度、介质对红外波段的吸收、泄漏过程的热现象等影响，泄漏将会对被检测设备或部件（管线、密封圈、呼吸口、法兰、螺纹连接、阀门等）的温度场或红外传播过程产生影响。可通过红外热像仪获取表面辐射红外分布情况来判断是否发生泄漏。

A.1.2 优点和局限性

1) 优点

本方法效率高，检测结果直观；配合长镜头，可检测高处或较难靠近的设备及工艺管线。

2) 局限性

- a. 受外部环境影响较大，成像效果与环境温度、表面发射率、泄漏效率、风速、拍摄距离和角度等因素有关；
- b. 较难实现泄漏的定量判断；
- c. 检测对象不能有遮挡。

A.2 范围

本检测方法属于对检测灵敏度要求不高的粗检漏方法，一般只确定被检对象是否有泄漏，而不能进行定量分析。

本检测方法只适用于泄漏介质温度同环境温度有明显差异（一般超过 50℃）、泄漏过程伴随着明显的吸热或者放热现象、泄漏介质在红外波段有很强的吸收等情况。

A.3 一般要求

- 1) 根据检测对象同检测人员的距离选择焦距合适的镜头；
- 2) 设备表面无大面积的锈蚀层或液体，否则应进行表面处理；
- 3) 应掌握被检测对象运行状况、结构特点、易泄漏部位等信息；
- 4) 包覆层应尽量拆除。

A.4 检测

A.4.1 检测前准备

应首先进行温度校准，待图像稳定后方可开始工作。

A.4.2 普检

- 1) 可先采用录像方式扫描可疑点，并设置在合理的温度范围；
- 2) 选择合适的背景物体，最好与泄漏气体温度有差别，可人工构造背景；
- 3) 将热像仪放置在合适的距离，通常 2-30m（取决于红外仪器和镜头），并将镜头对准检测目标、缓慢移动；
- 4) 发现异常后，再对泄漏部位进行精确定位；

5) 应尽可能在泄漏检修完成后, 再进行一次全面的复检, 重点检测密封部位, 保证运行温度正常, 消除潜在风险。

A.4.3 定位

- 1) 对于普检中发现的异常部位, 应开展精确定位测试;
- 2) 选择合适的背景物体, 最好与泄漏气体温度有差别, 可人工构造背景;
- 3) 在安全距离允许的条件下, 检测仪宜尽量靠近被测设备, 使被测设备尽量充满整个仪器的视场;
- 4) 应至少选择三个不同的方位和角度对同一检测点进行检测;
- 5) 检测角度和位置的选取应综合考虑检测现场的风速、风向等环境因素(在现场风速大于 1m/s 时, 检测点应包含迎风面和背风面)。

A.5 结果评定

对于不同的泄漏介质, 以及介质对红外热像图的影响方式不同, 应制定对应的分级准则。建议分为未发现泄漏、少量泄漏、大量泄漏三级; 将检测结果与泄漏等级一一对应。

应根据不同设备的不同泄漏后果制定严重度分级, 应充分考虑以下因素: 人员安全, 泄漏量危害, 历史温升数据、设备运行工况、最高允许运行温度、环境温度、湿度等。

附录 B (规范性附录)

承压设备内衬破损、结焦红外热成像检测和结果评定

B.1 概述

高温压力容器内部的隔热内衬材料破损和结焦会影响容器内外温度的热传导，并反映到设备表面温度分布上。

当衬里运行状态恶化时，衬里会发生裂纹、掏空甚至脱落，衬里热阻就会降低，壁温就会升高。当炉管内部结焦时，其热绝缘特性变差，相应部分的表面温度升高，在其表面热像图上会出现一个局部过热区。

B.2 范围

本检测方法属于对检测灵敏度要求不高的粗检方法，而不能进行具体损伤面积和损伤程度的定量分析。

B.3 一般要求

- 1) 建议支撑镜头的三角架应定点放置，三角架的高度、开度和镜头的仰角在每次检测时应尽量保持前后一致；
- 2) 应保证所测目标大小在热像仪的测量空间分辨率允许范围内；
- 3) 设备表面无大面积的锈蚀层或液体，否则应进行表面处理；
- 4) 包覆层应全部拆除，不具备拆除条件的应对该部位进行单独检测分析；
- 5) 应根据设备结构等情况制定检测方案和计算模型。

B.4 检测

B.4.1 应首先进行温度校准，待图像稳定后方可开始工作。

B.4.2 建议先采用热电偶测得温度，然后在相同部位不断调节红外发射率，直到温度相同。

B.4.3 局部出现高温时，须仔细将热像图与实物核对，以排除人孔、法兰、膨胀节等无保温情况，以免作出错误的判断。

B.5 结果评定

B.5.1 归一化热阻变化量计算

- 1) 根据传热学理论，需建立不同衬里材料的传热模型；
- 2) 根据容器多层的材料热传导系数、厚度等计算出其总热阻 R ；
- 3) 实际环境下测量热阻 R' ；
- 4) 计算归一化热阻变化量 δ 。

$$\delta = (R - R') / R \quad \dots\dots\dots \text{式 B-1}$$

B.5.2 结果分级

根据归一化热阻变化量对衬里破损情况进行分级

表 B.1 内衬破损、结焦红外热成像检测分级表

检测等级	归一化热阻变化量
------	----------

I	$\delta < 30\%$
II	$30 \leq \delta < 70\%$
III	$\delta \geq 70\%$

- 1) 检测等级为 I 级时，容器表面温升速率较小，设备可以正常运行；
- 2) 检测等级为 II 级时，容器表面温升速率急剧增大，这时要对设备进行跟踪检测，密切注意衬里损坏区域的发展趋势；
- 3) 检测等级为 III 级时，容器处于紧急状态，必须尽快采取相应的措施。

附录 C (规范性附录)

气瓶复合材料层红外热成像检测和结果评定

C.1 概述

在气瓶充气过程中由于气瓶内部压力变化、气体摩擦和冲击等会造成温度上升。当气瓶纤维缠绕层存在缺陷时，由于其导热系数不同造成表面局部温度变化异常，通过红外热像仪检测表面的温度变化，分析出内部缺陷。

采用蒸汽清洗内部热激励、内部温水灌装热激励以及气密试验过程热激励或其他被动式热成像检测方式，均可参考本部分执行。

C.2 范围

本检测方法可有效检测纤维复合层粘接、冲击等损伤，并确定其损伤面积尺寸；对于少量纤维断裂无法有效检测。

C.3 一般要求

C.3.1 应保持被检气瓶表面干燥、无油污，并尽可能提高表面红外发射率。条件允许时应使用可清洗涂料增强材料表面发射率；

C.3.2 应尽可能减少在检测过程中气瓶同其他物体进行的热传导、热对流。特别要避免纤维缠绕层同其他物体的直接接触；

C.3.3 应减少检测区域内空气扰动造成的对流等对受检材料的影响；

C.3.4 应减少检测区域内阳光或其他辐射源对受检材料表面温度的干扰；

C.3.5 应避免阳光或其他辐射源的直接照射或反射进入仪器镜头；

C.3.6 应保证环境温度在整个检测过程中相对稳定；

C.3.7 应保证在连续检测的过程中探测器和被检气瓶之间无遮挡。

C.4 检测

C.4.1 热像仪红外发射率的设置

在条件允许时，采用数字式温度计直接测量被监测设备一个部位的表面温度，然后调整红外热像仪的红外发射率参数，直到热像仪的温度显示与数字式温度计的测量数值相同，将此值作为红外热像仪的发射率参数值。

C.4.2 数据采集

如图 1 所示应根据被检气瓶相关法规、标准和使用情况来确定加压程序。升压速度一般不应小于 4MPa/min。升压的最高压力不低于气瓶工作压力的 0.9 倍，不高于气瓶工作压力。

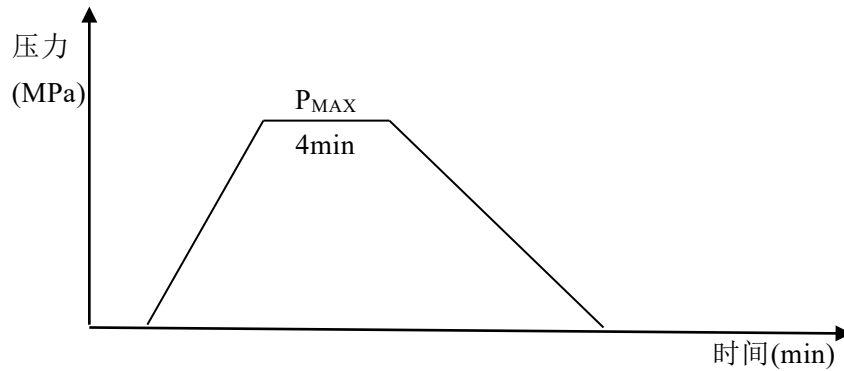


图 C.1 气瓶加压程序

C.5 数据分析与结果评价

C.5.1 数据分析

C.5.1.1 基本分析

通过观察原始热像图、一阶微分热像图、二阶微分热像图、直方图均衡化后热像图、高温区凸出显示热像图等，对缺陷进行分析和判断。

C.5.1.2 归一化温差分析

当通过基本分析发现疑似缺陷时，应通过归一化温差分析来判断是否为真实缺陷。

确定正常区域 $K1$ 与损伤中心 $K2$ 并导出两者的灰度（或温度）随时间的变化曲线 $L1$ 和 $L2$ 。

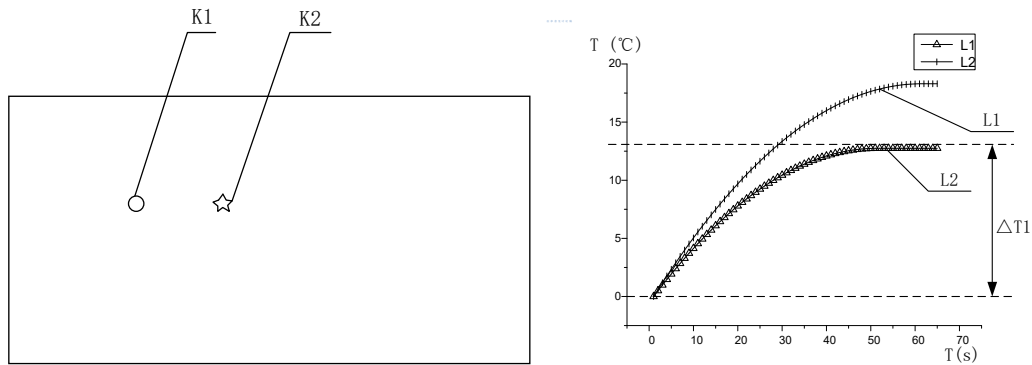


图 C.2 归一化温差分析

根据下式确定上述测试-对比点最大温差 $\Delta T1$ 与对比点最大温升 $\Delta T2$ （定义）的比值 TK ，归一化温度差：

$$TK = (\Delta T1) / (\Delta T2) \quad \text{式 C-1}$$

C.5.1.3 损伤尺寸

当缺陷为存在于缠绕层下表面或内部的分层缺陷时，设定一个能容纳缺陷的最小矩形框，计算其面积作为缺陷面积。

C.5.2 结果评定

应根据归一化温差和损伤尺寸进行评价，缺陷评价等级见表 C.1。

1) 缠绕层损伤等级为 1 级，无需其他处理。

2) 缠绕层损伤等级为 II 级, 建议对缺陷采用其他检测方法经行复验, 并缩短此气瓶的检验周期, 对其超标缺陷进行监测。

3) 缠绕层为损伤等级 III 级, 必须采用其他方法复验, 即使其他检测方法无法检出, 也必须缩短此气瓶的检验周期, 对其超标缺陷进行检测。

表 C.1 气瓶复合材料层红外热成像检测缺陷评价表

最大归一化温差 (TK) 缺陷面积 (S)	<0.3	0.3~0.6	≥0.6
	<10mm ²	I	II
≥10mm ²	II	III	III

附录 D (规范性附录)

承压设备保温层破损红外热成像检测和结果评定

D.1 概述

用红外热像仪沿着管线拍摄高温管线保温外壁的温度场图像，通过图像分析，可以得到保温层表面的平均温度，根据表面温度以及管道内介质温度，结合现场的测试条件，按照国家相关标准计算出散热损失，以是否满足国家标准中允许的最大散热损失要求来评价保温状况，还可以通过温差的异常来找到保温层破损处。

D.2 范围

本检测方法适用于介质温度同环境温度差异比较大的设备保温层破损检测。

D.3 一般要求

- 1) 根据检测对象同检测人员的距离选择焦距合适的镜头；
- 2) 重点关注管道拐弯处和连接处以及接头、阀门附近；
- 3) 设备表面无大面积的锈蚀层或液体，否则应进行表面处理；
- 4) 检测时应充分考虑环境因素的影响，尤其是风速以及表面发射率对检测精度影响较大。

D.4 检测

- D.4.1 应首先进行温度校准，待热像图稳定后方可开始工作。
- D.4.2 建议先采用热电偶测得温度，然后在相同部位不断调节红外发射率，直到温度相同。
- D.4.3 局部出现温度异常时，须仔细将热像图与实物核对，以免做出错误的判断。
- D.4.4 应记录出现温度异常的位置、面积、最大/最小温度值。

D.5 结果评定

D.5.1 依据 GB 50264 查找操作温度下的绝热层外表面最大允许散热损失 $[Q]$ ，由此来推算管道最高允许外表面温度 T_s 。

D.5.2 温差判别法

应根据最高允许外表面温度和实测温度差、温度异常区域面积进行评价对保温层损伤情况进行评价。

详细损伤评价方法应依据甲方和相关设备使用规范确定。