



中华人民共和国国家标准

GB/T 39638—2020

铸件 X 射线数字成像检测

X-ray digital radiographic testing for casting

2020-12-14 发布

2021-07-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 3

5 订货须知 4

6 射线检测技术分级和补偿规则 4

7 一般要求 5

8 检测技术 7

9 图像评定..... 19

10 检测记录和报告 20

附录 A（规范性附录） 图像最低像质值 21



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国铸造标准化技术委员会(SAC/TC 54)提出并归口。

本标准起草单位:沈阳铸造研究所有限公司、兰州瑞奇戈德测控技术有限公司、长沙戴卡科技有限公司、中铁宝桥集团有限公司、上海奕瑞光电子科技股份有限公司、缙云县克力尔检测器材有限公司、中信戴卡股份有限公司、苏州工业园区道青科技有限公司、成都凯赛尔电子有限公司、丹东奥龙射线仪器集团有限公司、上海汇众汽车制造有限公司、上海航天精密机械研究所、大唐锅炉压力容器检验中心有限公司、兰州兰石检测技术有限公司、兰州兰石集团有限公司铸锻分公司、荏平信发铝制品有限公司、中国兵器工业集团第五二研究所。

本标准主要起草人:李兴捷、孙忠诚、刘军、杨龙、卢旗锋、陶维道、王学斌、王汉超、郭宗山、王佶、徐旭、倪满生、乔日东、孙春贵、董文博、于涵、阿拉腾、罗湘、孔庆渤、危荃、刘颖卓、周鹏飞、蒋春宏、王炳正、杨武、李义彬、孙谱、王晨、刘峰、郭智敏、伍方明、邱昌昌、张洲旭。



铸件 X 射线数字成像检测

1 范围

本标准规定了铸件采用数字探测器阵列(DDA)的 X 射线数字成像检测技术分级和补偿规则、一般要求、检测技术、图像评定、检测记录和报告等。

本标准适用于钢、铁、铜及铜合金、镍及镍合金、铝及铝合金、镁及镁合金、钛及钛合金等材料的铸件,其他金属材料铸件也可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 5677 铸件 射线照相检测
GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证
GB/T 12604.11 无损检测 术语 X 射线数字成像检测
GB 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准
GB/T 23901.1 无损检测 射线照相检测图像质量 第 1 部分:丝型像质计像质值的测定
GB/T 23901.2 无损检测 射线照相检测图像质量 第 2 部分:阶梯孔型像质计像质值的测定
GB/T 23901.5 无损检测 射线照相检测图像质量 第 5 部分:双丝型像质计图像不清晰度的测定
GB/T 30821 无损检测 数字图像处理与通信
GB/T 35389 无损检测 X 射线数字成像检测 导则
GB/T 35394 无损检测 X 射线数字成像检测 系统特性
GBZ 98 放射工作人员健康要求
GBZ 117 工业 X 射线探伤放射防护要求

3 术语和定义

GB/T 12604.11 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

公称厚度 nominal thickness

材料的公称壁厚,不考虑偏差。

3.2

透照厚度 penetrated thickness

射线透照方向上的材料公称厚度。多壁透照时,穿透厚度为通过的各层材料公称厚度之和。

3.3

工件至探测器距离 object to DDA distance

沿射线束中心线测出的射线源侧被检工件表面至探测器间的距离。

3.4

射线源尺寸 source size

射线源的有效焦点尺寸。

3.5

射线源至工件距离 source to object distance

沿射线束中心线测出的射线源至射线源侧被检工件表面间的距离。

3.6

射线源至探测器距离 source to DDA distance

沿射线束中心线测出的射线源至探测器间的距离。

3.7

几何放大倍数 geometric magnification

射线源至探测器距离与射线源至工件距离的比值。

3.8

数字探测器阵列 digital detector array

探测器

将射线转换为成阵列化排列的、大小与所在区域曝光量成比例的模拟信号,然后对模拟信号进行模/数转换,并传递到计算机进行处理显示的电子装置。

3.9

探测器基本空间分辨率 basic spatial resolution of a digital detector

双丝型像质计直接放置在探测器上,放大倍数为 1 时,测量得到的第一对双峰调制度值小于 20% 的丝对,表示探测器可分辨的最小几何尺寸。数字探测器本身特性,是在数字图像上所测定的图像不清晰度值的 1/2,且对应于有效像素尺寸。

3.10

图像空间分辨率 spatial resolution of a digital image

双丝型像质计直接放置在被检工件的射线源侧,测量得到的第一对双峰调制度值小于 20% 的丝对,表示探测器在一定放大倍数下数字图像中可分辨的最小几何尺寸。工件检测获得数字图像中所测定图像不清晰度值的 1/2。

3.11

信噪比 signal to noise ratio

图像测定区的灰度值的平均值与灰度值的标准差(噪声)之比。

3.12

归一化信噪比 normalized signal to noise ratio

图像信噪比被空间分辨率归一化处理的值。

注:直接在图像中测量,或测量 $SNR_{measured}$ 和空间分辨率 $SR_{b\ image}$,经下式归一化计算得到:

$$SNR_N = SNR_{measured} \times (88.6 \mu m / SR_{b\ image})$$

3.13

对比度噪声比 contrast to noise ratio

表示细节的可识别性,细节的对比度与背景噪声(背景的灰度标准偏差)之比。

3.14

归一化对比度噪声比 normalized contrast to noise ratio

对比度噪声比被空间分辨率归一化处理的值。

注:直接在数字图像中测量,或测量 CNR 和空间分辨率 $SR_{b\ image}$,经下式归一化计算得到:

$$CNR_N = CNR \times (88.6 \mu m / SR_{b\ image})$$

3.15

集群核像素 cluster kernel pixel

在 3×3 邻域内,好像素少于 5 个的坏像素群。

3.16

固有不清晰度 inherent unsharpness

探测器系统的不清晰度,双丝型像质计直接放置于探测器表面,获得的数字图像上测量。

$$U_i = 2 \times SR_{b, \text{detector}}$$

3.17

几何不清晰度 geometric unsharpness

由射线源尺寸和透照几何布置引起的图像不清晰度。

$$U_g = db / f$$

3.18

图像不清晰度 image unsharpness

一个明锐的边界成像后的影像模糊区域的宽度,双丝型像质计直接放置于放射源侧工件表面,获得的数字图像上测量。

3.19

特定材料厚度宽容度 specific material thickness range

达到规定图像质量的材料厚度范围。

4 符号

表 1 所列符号适用于本文件。

表 1 符号和说明

符号	说明
b	工件至探测器距离
CKP	集群核像素
CNR	对比度噪声比
CNR_N	归一化对比度噪声比
D	探测器
d	射线源尺寸
DDA	数字探测器阵列
F	射线源至探测器距离
f	射线源至工件距离
f_{\min}	射线源至工件最小距离
M_{opt}	最佳几何放大倍数
S	射线源
SMTR	特定材料厚度宽容度

表 1（续）

符号	说明
SNR	信噪比
SNR _N	归一化信噪比
SR _b ^{detector}	探测器基本空间分辨率
SR _b ^{image}	图像空间分辨率
<i>t</i>	公称厚度
<i>U_g</i>	几何不清晰度
<i>U_i</i>	固有不清晰度
<i>U_{im}</i>	图像不清晰度
<i>τw</i>	透照厚度

5 订货须知

- 5.1 结构复杂铸件中的无法检测区域,合同双方应在检测前协商确定,并在透照工艺文件中注明。
- 5.2 在双方合同中应明确涉及检测的内容如下:
- a) 检测时机;
 - b) 表面状况;
 - c) 检测范围和区域;
 - d) 检测标准、技术等级;
 - e) 透照布置图;
 - f) 铸件上检测区域的标识;
 - g) 图像的标记;
 - h) 图像质量要求;
 - i) 验收标准;
 - j) 任何特殊要求,如:检测缺陷的最小尺寸。
- 5.3 供货方的责任仅限于合同中指定的技术条件,不做检测的铸件,不能按后序的检测结果判定;初始检测验收后进行复检,若发生以下情况,则不应按复检的结果判定。
- a) 复检方法或工艺与合同规定不同;
 - b) 经过机加透照厚度减少 50%或以上。

6 射线检测技术分级和补偿规则

6.1 射线检测技术分级

- 6.1.1 射线检测技术分为两级:
- A 级:基本技术;
 - B 级:优化技术。

- 6.1.2 射线检测技术等级选择,应符合相关标准、设计图样、技术条件的规定,在无特殊要求时,一般应选用 A 级技术。A 级技术不能满足检测要求时,应选用 B 级技术。像质计达不到附录 A 的表 A.1~表 A.4 规定的技术不适用本标准。
- 6.1.3 本标准与 GB/T 5677 胶片射线照相检测具有等效性。
- 6.1.4 自动检测技术主要用于批产铸件的快速检测,经合同双方商定,其对比度灵敏度、不清晰度可适当调整。
- 6.1.5 当由于技术或结构原因不能满足 B 级技术的透照条件时(例如射线源类型、射线源至工件距离等),经合同双方商定,可选用 A 级技术规定的透照条件,其灵敏度损失应采取增加 SNR_N (推荐至少升至 1.4 倍)来补偿。若补偿后灵敏度达到了 B 级技术的规定,可认为铸件按 B 级技术检测。针对图 3 的透照布置,若按 8.8.1.7 减小射线源至工件距离(f),则无需按上述方法进行补偿。

6.2 补偿规则

- 6.2.1 补偿规则分为补偿规则 I (CP I)、补偿规则 II (CP II)和补偿规则 III (CP III),以便数字成像检测获得足够的对比度灵敏度。
- 6.2.2 使用补偿规则的目的在于获得最小的 $CNR_N/\Delta w$,即基于被检材料厚度差 Δw 的归一化对比度噪声比;当 $CNR_N/\Delta w$ 因下列某个参数值不足而未达到要求时,可通过提高 SNR 进行补偿:
- CP I :针对对比度降低(如:由于管电压增高),通过提高 SNR 进行补偿(如:增加管电流或曝光时间)。
- CP II :针对探测器不清晰度大($SR_{b\ image}$ 大于规定值),通过提高 SNR 进行补偿(增加单丝型或阶梯孔型像质值,补偿双丝型像质值识别损失)。
- CP III :针对探测器局部不清晰度大(DDA 坏像素修正导致的),通过提高 SNR 进行补偿。
- 6.2.3 补偿规则基于小尺寸缺陷($\Delta w \ll w$)的近似公式,见公式(1):

$$\frac{CNR_N}{\Delta w} = c \frac{\mu_{eff} SNR}{SR_{b\ image}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

c ——常数;

μ_{eff} ——有效衰减系数。

7 一般要求

7.1 检测人员

- 7.1.1 检测人员应符合 GB/T 9445 或其他相关标准要求,通过工业数字射线检测技术培训考核,并从事与其等级要求相符的工作。
- 7.1.2 检测人员的健康应符合 GBZ 98 的规定,上岗前应进行辐射安全知识的培训考核。

7.2 检测系统

- 7.2.1 检测系统的射线源、探测器、机械装置、图像处理装置、辐射安全防护装置等配置应符合 GB/T 35389 的规定要求。
- 7.2.2 系统特性的测定方法应按照 GB/T 35394 的规定要求。
- 7.2.3 系统特性校验周期不超过 12 个月,在如下情况下应进行校验:
- a) 检测系统有改变时;
 - b) 检测过程中系统或图像质量有明显异常时;

- c) 系统停止使用超过 1 个月后重新使用时。

7.3 像质计

7.3.1 采用的像质计包括丝型、阶梯孔型、双丝型像质计,其型号和规格应分别符合 GB/T 23901.1、GB/T 23901.2、GB/T 23901.5 的规定。

7.3.2 丝型像质计或阶梯孔型像质计用于图像的对比度灵敏度测定,像质计材料的吸收系数应尽可能地接近或等同于被检材料的吸收系数。

7.3.3 双丝型像质计用于测量探测器和图像的空间分辨率。

7.4 射线防护

射线检测的辐射防护应遵循 GB 18871、GBZ 117 及相关安全防护法规的规定。

7.5 工艺文件

7.5.1 除非协议或合同中有特殊规定,否则应按工艺文件进行检测,合同双方应商定工艺文件的具体要求。工艺文件包括工艺规程和操作指导书。

7.5.2 工艺规程中应至少包含如下内容:

- a) 适用范围;
- b) 依据的标准、法规及其他技术文件;
- c) 检测人员资格要求;
- d) 检测设备、探测器系统;
- e) 像质计类型及使用;
- f) 检测标准、验收标准、验收级别;
- g) 技术等级;
- h) 射线能量的选择;
- i) 透照方式;
- j) 透照工艺参数;
- k) 图像处理参数;
- l) 图像质量要求:不清晰度、对比度灵敏度、归一化信噪比等;
- m) 图像显示与评定;
- n) 检测记录和报告;
- o) 系统性能校验。

7.5.3 首次使用的操作指导书应进行工艺验证,以验证图像质量是否能够达到标准规定的要求。操作指导书中应至少包含如下内容:

- a) 铸件名称、编号、材质、热处理状态、检测部位、表面状态、检测时机;
- b) 射线机(型号、射线源尺寸)、探测器(型号、基本空间分辨率、归一化信噪比等);
- c) 像质计类型及使用;
- d) 检测标准、验收标准、验收级别;
- e) 技术等级;
- f) 透照方式及布置;
- g) 透照工艺参数(管电压、曝光量、透照几何参数等);
- h) 图像处理参数;

- i) 图像质量要求:不清晰度、对比度灵敏度、归一化信噪比等;
- j) 图像显示与评定。

8 检测技术

8.1 铸件表面处理和检测时机

- 8.1.1 铸件表面应去除任何可能遮盖或混淆铸件内部缺陷的状态,清除铸件上影响图像中缺陷影像辨认的多余物。
- 8.1.2 检测时机应满足技术条件、合同或订货须知的要求。若无特殊规定时,检测宜在热处理前、热处理后、交货状态下进行。

8.2 透照方式

8.2.1 一般规定

- 8.2.1.1 应根据铸件的结构特点和技术条件的要求选择适宜的透照方式,应优先选用单壁透照方式,在单壁透照不能实施的情况下,才可以采用双壁透照方式。透照应按 8.2.2~8.2.7 的规定执行。
- 8.2.1.2 若条件允许,曲面铸件应优选图 3 内透照方式,以获得最佳的透照方向。
- 8.2.1.3 按图 4 透照方式,在满足灵敏度和不清晰度要求的前提下,放射源至被检区表面距离应尽可能最小。
- 8.2.1.4 按图 5、图 6 透照方式,缺陷应按单壁的厚度分级,壁厚不同时,应参照较小的壁厚。
- 8.2.1.5 若几何形状造成其他方式难以应用或者能够获得更好的灵敏度,可按图 6 使用双壁双影透照方法,以确保缺陷检出率,图像质量满足要求。

8.2.2 平面铸件单壁透照

射线源位于被检工件前侧,探测器位于另一侧,见图 1。

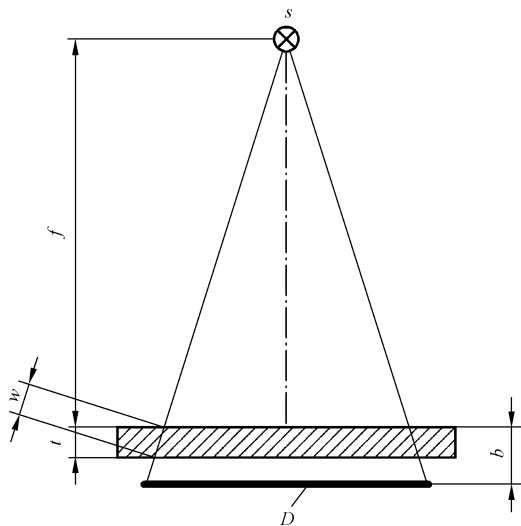


图 1 平面铸件单壁透照布置

8.2.3 曲面铸件单壁外透照

射线源位于被检工件凸面侧,探测器位于凹面侧,见图 2。

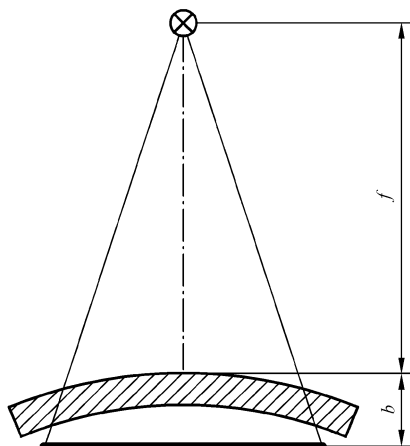


图 2 曲面铸件单壁外透照布置

8.2.4 曲面铸件单壁内透照

射线源位于被检工件凹面侧,探测器位于凸面侧,见图 3。

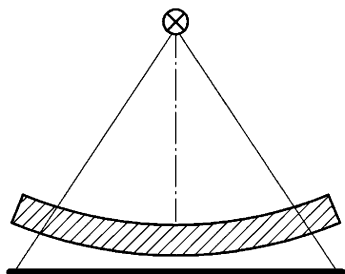


图 3 曲面铸件单壁内透照布置

8.2.5 平面或曲面铸件双壁单影透照

射线源与探测器位于被检工件的两侧,见图 4。

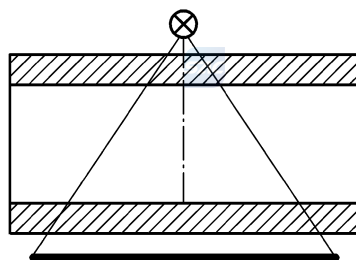


图 4 平面或曲面铸件双壁单影透照布置

8.2.6 平面或曲面铸件双壁双影透照

射线源与探测器位于被检工件的两侧,分段或整体曝光,见图 5、图 6。

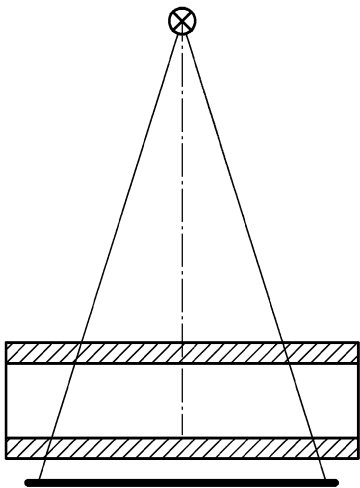


图 5 平面或曲面铸件双壁双影透照布置(分段曝光)

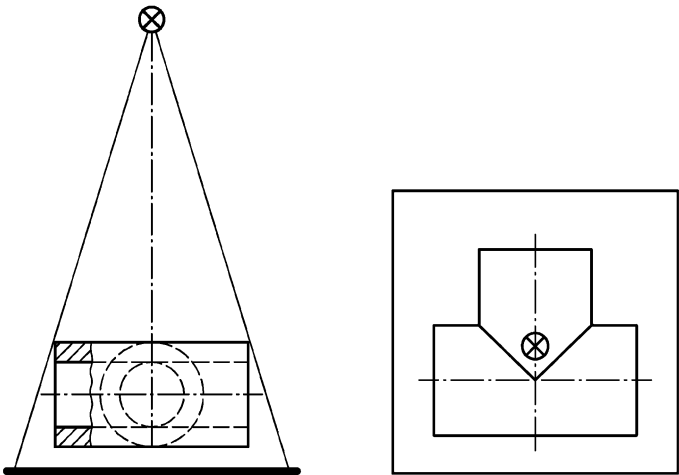
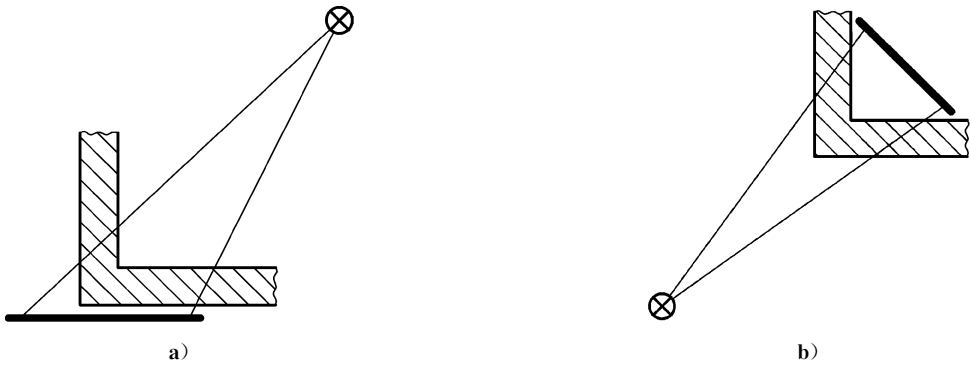


图 6 平面或曲面铸件双壁双影透照布置(整体曝光)

8.2.7 复杂几何形状铸件透照

除非另有约定,见图 7~图 11。



b) 只有在 a)不能实现时才能使用

图 7 边缘和法兰铸件透照布置

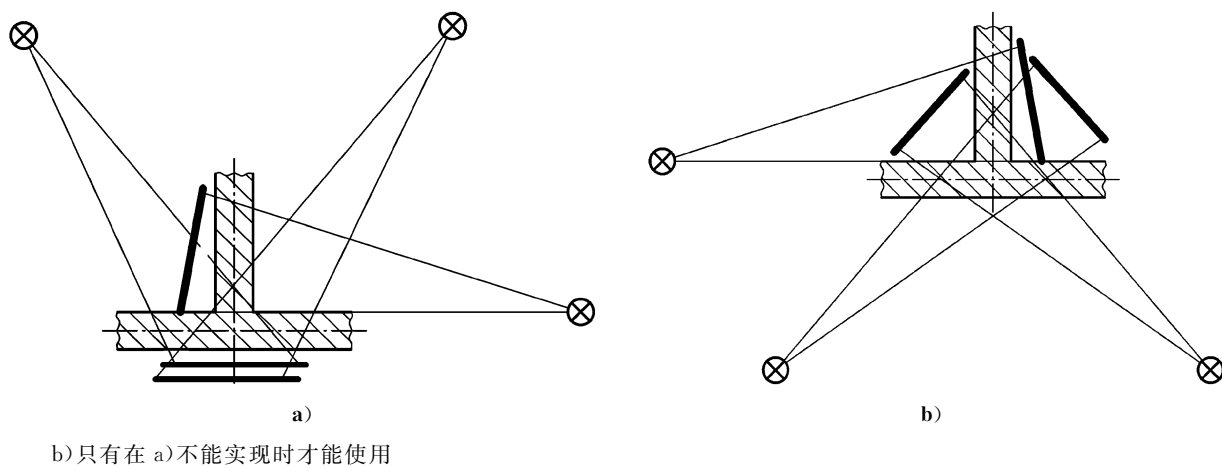


图 8 肋形铸件透照布置

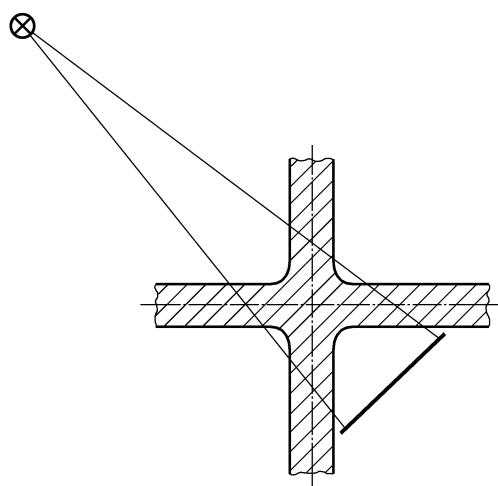


图 9 十字形铸件透照布置

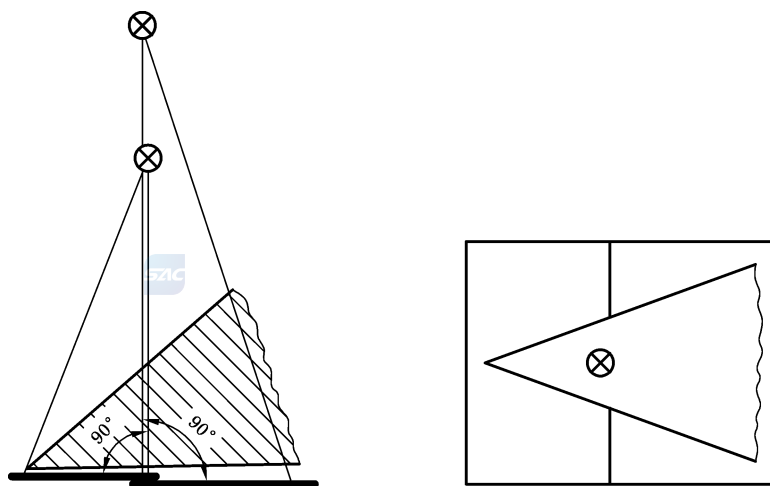


图 10 楔形铸件透照布置

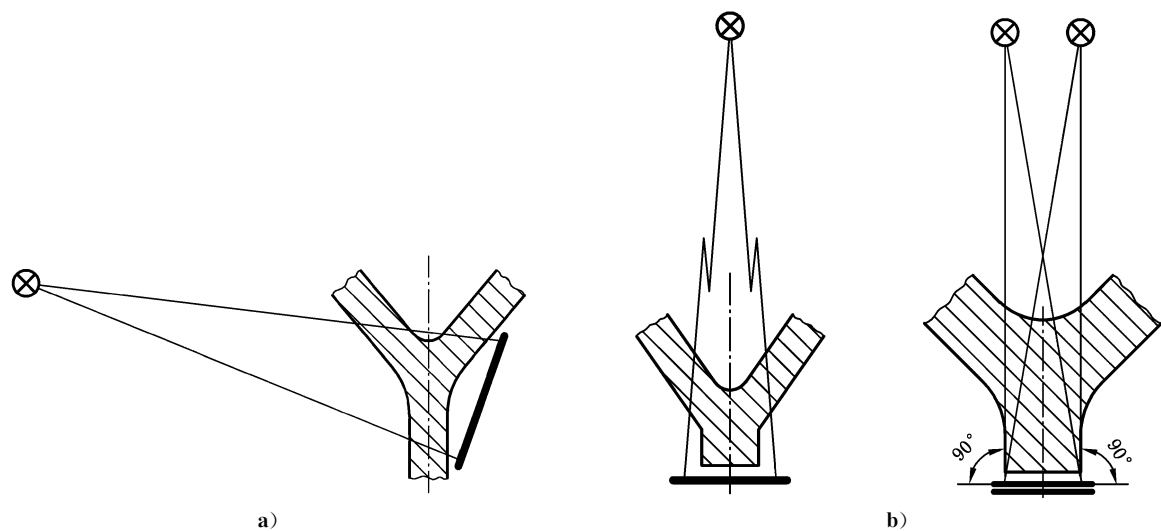
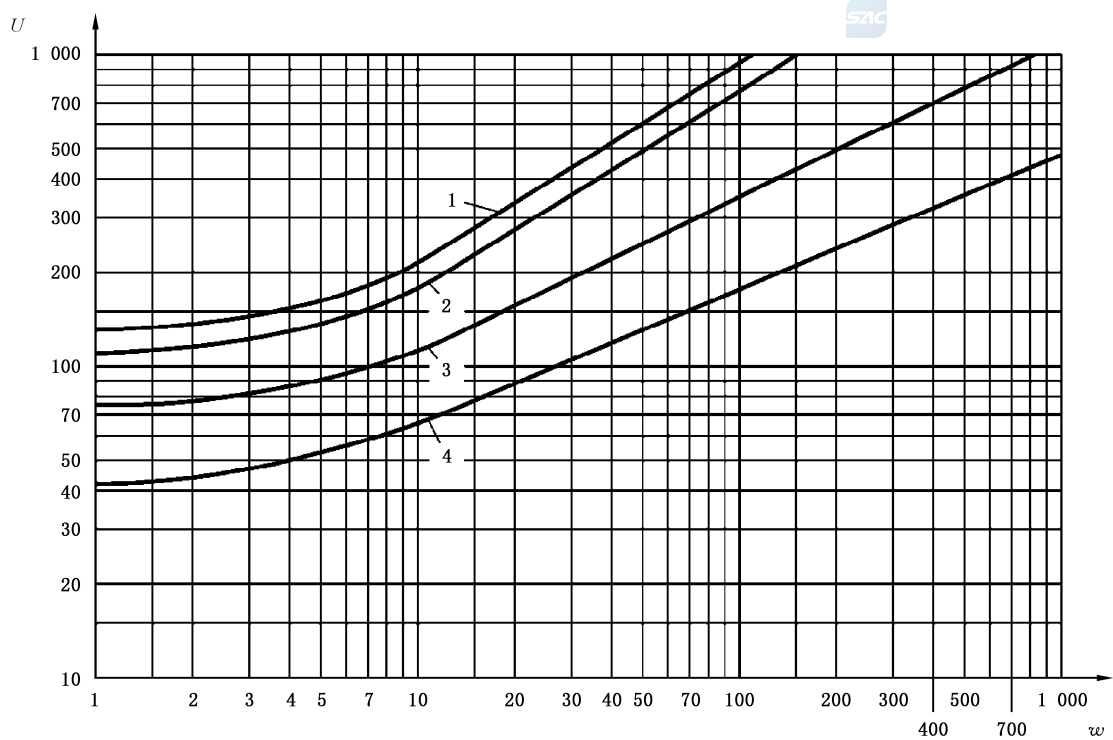


图 11 肋形和支撑结构铸件透照布置

8.3 射线能量的选择

8.3.1 管电压 1 000 kV 以下的 X 射线机

8.3.1.1 在保证穿透工件的前提下,宜尽可能采取较低的管电压,以使图像得到尽可能高的 SNR_N 。推荐的胶片法管电压与材料的透照厚度之间的关系(见图 12),仅作为参考,数字成像的最佳管电压应高于胶片法。



说明:
1——铜及铜合金或镍及镍基合金;
2——钢或铁;
3——钛及钛合金;
4——铝及铝合金;
 w ——透照厚度,mm;
 U ——X 射线电压,kV。

图 12 推荐的不同透照厚度允许的 X 射线 1 000 kV 以下最高管电压参考值

8.3.1.2 经过精确校正的探测器,可以使用高于规定的管电压进行检测。

8.3.1.3 补偿规则 I (CP I),通过以下方式提高图像对比度灵敏度:

- 在 SNR_N 不变的条件下,提高对比度(降低管电压和提高曝光量);
- 在对比度不变(管电压不变)的条件下,增加 SNR_N (提高曝光量);
- 在曝光量不变的条件下,提高管电压,对比度下降, SNR_N 提高。若更高的管电压可使 SNR_N 提高值远大于对比度降低值,则对比度灵敏度提高。

8.3.1.4 检测截面厚度变化较大铸件时,可以将规定的管电压适当提高,若一次曝光成像不同厚度,使用这些厚度的平均值。

8.3.2 1 MeV 及以上 X 射线设备

表 2 给出了胶片法 1 MeV 及以上 X 射线设备对钢、铁、铜和镍基合金材料的透照厚度范围,仅作为参考。

表 2 1 MeV 及以上 X 射线设备对钢、铁、铜和镍基合金材料的透照厚度范围参考值

射线源	透照厚度 w^a /mm	
	A 级	B 级
X 射线 $>1\text{ MeV} \sim 4\text{ MeV}$	$30 \leq w \leq 120$	$50 \leq w \leq 100$
X 射线 $>4\text{ MeV} \sim 12\text{ MeV}$	$w \geq 50^b$	$w \geq 70^b$
X 射线 $>12\text{ MeV}$	$w \geq 80^b$	$w \geq 100^b$
^a 一次曝光成像不同厚度,应使用这些厚度的平均值。		
^b 满足图像质量要求,A 级的最小透照厚度可减少 10 mm,B 级的最小透照厚度可减少 20 mm。		

8.4 探测器系统的选择

8.4.1 探测器系统参数主要是基本空间分辨率和归一化信噪比,按 GB/T 35394 的要求测定。

8.4.2 归一化信噪比的测定区,分为左上下、右上下(距探测器有效区域边缘 10% 的角上)和中心共 5 个区,测定区为不小于 50 像素 \times 50 像素,测定结果是 5 个区的平均值。归一化信噪比表示其检测特性,用来划分探测器系统的等级。

8.4.3 基本空间分辨率是系统特性的主要参数。

8.4.4 像素尺寸不同但归一化信噪比相同的探测器系统,具有相同的检测能力。

8.4.5 探测器系统归一化信噪比的选择,应保证实现检测图像归一化信噪比满足表 3 和表 4 的要求。

表 3 最小 SNR_N ——钢、铁、铜和镍基合金

射线能量	透照厚度 w /mm	最小 SNR_N	
		A 级	B 级
$\leq 50\text{ kV}$	—	100	150
$>50\text{ kV} \sim 150\text{ kV}$		70	120
$>150\text{ kV} \sim 250\text{ kV}$		70	100
$>250\text{ kV} \sim 350\text{ kV}$	$w \leq 50$	70	100
	$w > 50$	70	70

表 3 (续)

射线能量	透照厚度 w/mm	最小 SNR_N	
		A 级	B 级
$>350\text{ kV}\sim 1\,000\text{ kV}$	$w\leq 50$	70	100
	$w>50$	70	70
$>1\text{ MeV}\sim 5\text{ MeV}$	$w\leq 100$	70	100
	$w>100$	70	70
$>5\text{ MeV}$	$w\leq 100$	70	100
	$w>100$	70	70

表 4 最小 SNR_N ——铝、镁、钛、锌

射线能量	最小 SNR_N	
	A 级	B 级
$\leq 150\text{ kV}$	70	120
$>150\text{ kV}\sim 250\text{ kV}$	70	100
$>250\text{ kV}\sim 500\text{ kV}$	70	100

8.5 一次透照最大区域

8.5.1 根据特定材料厚度宽容度(SMTR)来确定一次透照最大区域的范围,一次透照最大区域的厚度变化小于材料厚度宽容度。

8.5.2 在一次透照最大区域内,检测图像质量应符合要求。

8.5.3 特定材料厚度宽容度(SMTR)按 GB/T 35394 的要求测定。

8.6 射线方向

8.6.1 一般情况下射线束应对准被检区中心,并与被检工件垂直;建议优先选择有利于发现缺陷的方向透照。

8.6.2 当受铸件形状结构的限制时,入射辐射角允许不超过 30° 的角度,引起的检测图像变形应不影响对缺陷的有效识别评定。

8.7 散射线控制

为减少散射线的影 响,可采用以下措施控制:

- a) 在射线源窗口前,安装滤波板;
- b) 在射线源窗口前,安装限束器;
- c) 在探测器前工件后,安装滤波板。

8.8 射线源至工件最小距离

8.8.1 一般规定

8.8.1.1 射线源至工件最小距离 f_{\min} 与射线源尺寸 d 和工件至探测器距离 b 有关,当射线源尺寸有两

个方向尺寸时,应取较大值。

8.8.1.2 射线源至工件距离 f 的选择,除图 2、图 3 所示透照布置外,探测器接近工件,应使 f/d 符合公式(2)和公式(3)。

A 级:

$$f/d \geq 7.5b^{2/3} \dots\dots\dots (2)$$

B 级:

$$f/d \geq 15b^{2/3} \dots\dots\dots (3)$$

f_{\min} 值可根据图 13 诺模图确定,诺模图按公式(2)和公式(3)制作。

单位为毫米

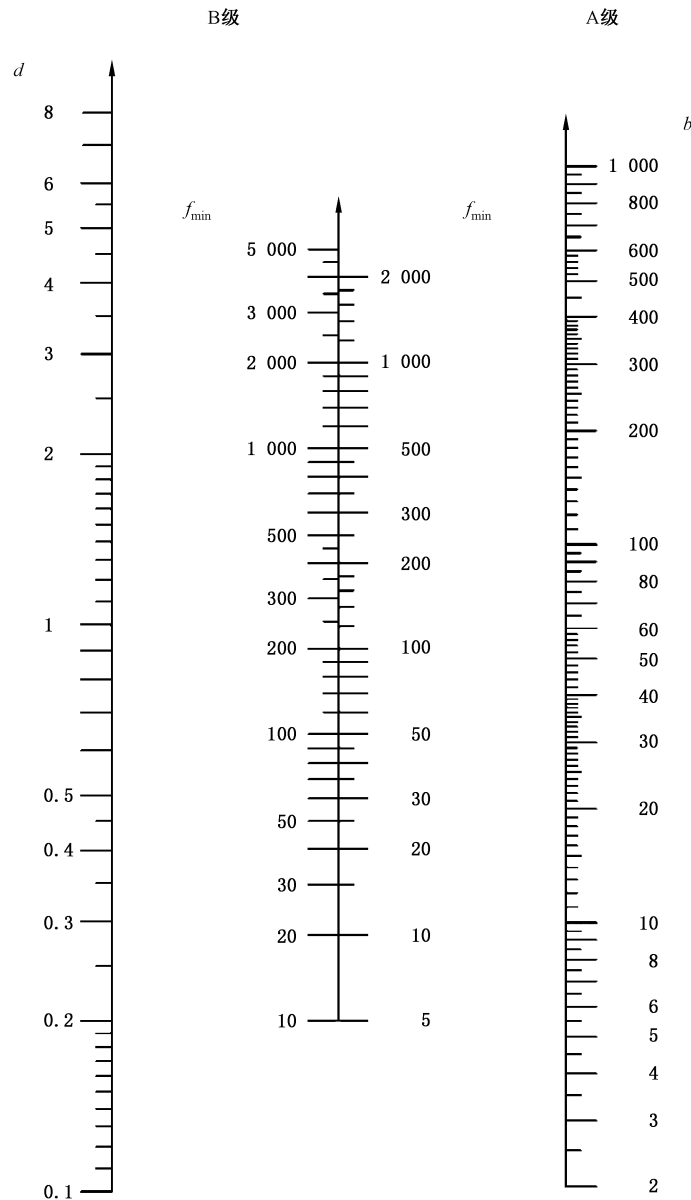


图 13 确定射线源至工件最小距离 f_{\min} 的诺模图

8.8.1.3 针对图 2、图 3 所示透照布置选择射线源至工件距离 f 时,探测器接近工件,应使 f/d 符合公式(4)和公式(5)。

A 级:

$$f/d \geq 7.5 \frac{b}{\sqrt[3]{t}} \dots\dots\dots (4)$$

B 级:

$$f/d \geq 15 \frac{b}{\sqrt[3]{t}} \dots\dots\dots (5)$$

8.8.1.4 当探测器接近工件,按工件至探测器距离 b 选择探测器的基本空间分辨率 SR_b^{detector} 应符合公式(6)和公式(7):

A 级:

$$SR_b = \frac{\sqrt[3]{b}}{15} \dots\dots\dots (6)$$

B 级:

$$SR_b = \frac{\sqrt[3]{b}}{30} \dots\dots\dots (7)$$

8.8.1.5 射线源至工件最小距离 f_{\min} 按公式(2)和公式(3)或图 13 确定的前提是探测器的基本空间分辨率 SR_b^{detector} 小于公式(6)或公式(7)的计算值,丝型或阶梯孔型像质值,通过增加信噪比(CP II)能达到表 A.1~表 A.4 要求。

8.8.1.6 当 $b < 1.5t$ 时,公式(2)和公式(3)及图 13 中的 b 值可用公称厚度 t 取代。采用双壁单影透照(8.2.5), b 值应取公称厚度 t ,采用双壁双影透照(8.2.6), b 值应取外部尺寸。

8.8.1.7 采用曲面内透照(8.2.4),允许射线源至工件距离减少不超过规定值的 40%,在图像像质值满足要求的前提下,经合同双方商定可进一步减少射线源至工件距离。

8.8.1.8 采用 A 级技术时,若需检测平面型缺陷,为使几何不清晰度减小为原来的 1/2,应按 B 级技术确定射线源至工件最小距离 f_{\min} 。对裂纹敏感度大的材料有更为严格的技术要求时,应选用灵敏度比 B 级更优的技术进行透照。

8.8.2 几何放大技术

8.8.2.1 图像的对比度灵敏度和空间分辨率不能满足表 A.1~表 A.5 要求时,可以通过采用提高图像归一化信噪比 SNR_N (见 8.15.4,CP II 补偿规则)或采用几何放大技术的方式,使其达到规定的要求。

8.8.2.2 确定选择最佳放大倍数时,应通过在工件的源侧和探测器侧使用的双丝型像质计验证:

——若 $2 \times SR_b^{\text{detector}} > d$,则双丝型像质计应放置在工件的探测器侧;

——若 $2 \times SR_b^{\text{detector}} \leq d$,则双丝型像质计应放置在工件的源侧。

8.8.2.3 推荐两侧同时放置双丝型像质计,但在一定的射线源尺寸情况下确定了最佳放大倍数后,工件检测时只需放置一个双丝型像质计。

8.8.2.4 通过最佳放大倍数 M_{opt} 、几何不清晰度 U_g 和基本空间分辨率 SR_b^{detector} 相关的公式(8)、公式(9)、公式(10)确定图像不清晰度 U_{im} :

$$M_{\text{opt}} = 1 + \left(\frac{2SR_b^{\text{detector}}}{d} \right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{M_{\text{opt}}} \sqrt{U_g^2 + (2SR_b^{\text{detector}})^2} \dots\dots\dots (9)$$

$$U_g = \left(\frac{F}{f} - 1 \right) d = (M_{\text{opt}} - 1) d \dots\dots\dots (10)$$

式中:

SR_b^{detector} ——探测器基本空间分辨率;

- F ——射线源至探测器距离；
 f ——射线源至工件距离；
 U_g ——几何不清晰度；
 d ——射线源尺寸；
 M_{opt} ——按 F/f 确定的最佳几何放大倍数；
 U_{im} ——A 级和 B 级技术检测，表 A.5 允许的图像最大不清晰度值。

8.8.2.5 可通过增加放大倍数和/或减小射线源尺寸，使图像不清晰度达到表 A.5 要求，应由工件上放置的双丝型像质计验证。

8.8.2.6 通常工件源侧和探测器侧的放大倍数不同，因此，宜以被检工件透照中心区域确定放大倍数，工件源侧和探测器侧的放大倍数差应不超过 $\pm 25\%$ 。

8.8.2.7 若放大倍数差超过 $\pm 25\%$ ，应重新设置检测几何条件，以便使工件的源侧和探测器侧的图像不清晰度满足表 A.5 要求。

8.8.2.8 若使用 8.15.4 的 CP II 补偿规则，则可选择较小的放大倍数。

8.9 标记与标识

8.9.1 图像标识

8.9.1.1 被检工件的每一个透照部位，宜放置由高密度材料制成的字母、数字、符号组成的识别标记，如：铸件编号、部位编号、定位标记、返修标记、曝光日期等，表征检测图像所属工件、部位等信息。图像标识应尽可能位于有效评定区之外，并确保每一透照部位标记明确无误。

8.9.1.2 图像标识可能对缺陷自动识别产生影响，自动检测时可以不使用识别标识，检测部位的识别应根据有关技术文件的要求，通过软件或内部排序来实现。

8.9.2 工件标记

工件表面应做永久性标记，以确保每幅图像准确定位，但不包括自动检测。若铸件的性质或使用条件不允许在铸件表面做永久性标记时，应采用准确的透照示意图或拍照等方式来记录。

8.9.3 图像搭接

当透照区域要采用两幅以上的图像时，每幅图像应具有一定的搭接区域，以确保整个受检区域均被透照。应将高密度搭接标记置于搭接区的工件表面，并使之能显示在每幅图像上。若按顺序检测，每幅图像上均显示高密度搭接标记。精确定位的铸件自动检测，不需要使用搭接标记。

8.10 像质计的使用

8.10.1 丝型和阶梯孔型像质计使用

8.10.1.1 图像的对比度灵敏度应使用丝型像质计或阶梯孔型像质计验证和评定，并满足表 A.1～表 A.4 规定。

8.10.1.2 像质计应优先放置在工件射线源侧表面边缘上，像质计应与工件表面紧贴，并置于厚度均匀区，在图像上该区具有均匀的归一化信噪比。

8.10.1.3 若像质计不能按标准放置在铸件上，可放置在等效厚度试块上，用同一探测器进行对比度灵敏度验证。

8.10.1.4 若需在相同条件下得到大量图像，每个位置一次曝光，则应至少放置一个像质计验证对比度灵敏度。

8.10.1.5 检测不同壁厚的区域，像质计应按照壁厚最大的部位选择并放置在壁厚最大部位。

8.10.1.6 中空工件检测探测器侧单壁,像质计可以放置在工件内部单壁射线源侧表面上。

8.10.1.7 使用丝型像质计时,其位置应确保至少有 10 mm 线长显示在归一化信噪比均匀的图像中。

8.10.1.8 像质计若不能放置在射线源一侧,也不能使用等效厚度试块的情况下,可将其放置在探测器侧,应紧贴像质计放置高密度材料“D”标记;除非几何结构使其无法实现,标记影像应位于有效评定区之外,并注明在检测报告中。

8.10.1.9 采取相关措施能保证,类似的被检工件或区域是以相同的曝光参数和透照技术进行检测,且获得的图像对比度灵敏度没有差异,则不必对每幅图像进行对比度灵敏度验证,图像对比度灵敏度验证范围应由合同双方商定。

8.10.2 双丝型像质计使用

8.10.2.1 探测器系统基本空间分辨率按 GB/T 35394 要求测定,验证系统硬件是否满足表 A.5 透照厚度的规定。

8.10.2.2 图像空间分辨率按 GB/T 35394 要求测定,测定的图像空间分辨率对应透照厚度应满足表 A.5 的规定。

8.10.2.3 对工件进行数字射线检测时,不强制要求进行双丝型像质计验证,可以使用具有代表性试件验证。

8.10.2.4 用于图像空间分辨率,单壁单影透照时的透照厚度对应于工件的公称厚度,双壁双影透照(8.2.6)时,双丝型像质计放置于工件射线源侧表面上,以外部尺寸为透照厚度。

8.10.2.5 用于双壁双影透照的探测器基本空间分辨率,应达到不低于以两倍壁厚作为透照厚度所对应表 A.5 的规定值。

8.10.2.6 双丝型像质计放置时,其金属丝与数字图像的行或列倾斜角度应为 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。

8.10.2.7 若采用几何放大技术(见 8.8.2),双丝型像质计应用于各种几何放大倍数,工件的全部图像都应放置双丝型像质计测定图像空间分辨率,双丝型像质计可以放置在等效厚度试块上。

8.10.3 自动检测使用

图像的像质计影像可能对缺陷自动识别产生影响,在自动检测时可以不使用像质计,但图像质量应通过使用丝型或阶梯孔型像质计和双丝型像质计定期核查。

8.11 曝光曲线

数字射线检测系统应绘制出常用被检材料的曝光曲线,推荐采用以管电压为参数,纵坐标为曝光量,横坐标为透照厚度的曝光曲线,制作方法按 GB/T 35394 执行,按曲线确定曝光参数。

8.12 变截面透照成像技术

对于截面厚度变化较大的铸件,在满足规定的图像质量要求前提下,一次曝光成像,增大厚度有效透照范围,其技术方法如下:

- a) 提高射线能量;
- b) 厚度补偿;
- c) 选择更高动态范围的探测器。

8.13 数据处理

8.13.1 探测器校正

8.13.1.1 应按照制造商推荐的程序校正探测器,探测器校正包括偏置校正(暗校正)和增益校正(亮校

正),增益校正至少进行一次。多点增益校正有利于探测器信噪比的提高和线性改善。

8.13.1.2 校正图像应作为质量控制原始图像保存,探测器校正应定期或在曝光条件发生较大改变时进行。

8.13.2 探测器坏像素修正

8.13.2.1 坏像素是探测器中性能超出规范要求的像素单元,应按制造商的指南确定并记录坏像素分布图。应对坏像素进行插值处理,这是使用探测器检测的必要程序。探测器检测成像区内不宜存在集群核像素(CKP),若 CKP 远小于要检测的最小缺陷尺寸,则可以使用。

8.13.2.2 更高的 SNR_N 可补偿由于坏像素插值处理造成的局部不清晰度的增大。

8.13.2.3 应定期对坏像素进行评定。

8.13.3 图像处理

8.13.3.1 图像应对信噪比 SNR 、空间分辨率 SR_b 和归一化信噪比 SNR_N 进行评价,可通过窗宽和窗位技术调整,获得最佳显示图像。检测软件中应集成有积分降噪、 SR_b 、 SNR 、 SNR_N 测定工具,用于图像显示和评估。

8.13.3.2 应具有图像缩放功能,用于关键图像分析评估。

8.13.3.3 对存储的原始图像进一步处理时,应有明确记录,并得到合同双方的许可,且不得修改所存储的原始图像数据。

8.13.3.4 若进一步的图像处理是为了评价丝型或阶梯孔型像质值时,则应采用相同的处理参数对铸件评定和确定像质值。

8.14 图像显示评定条件与存储

8.14.1 图像应在较暗的室内评定,背景光反射不能干扰图像评定;显示器设置应使用适当的测试图像校验。

8.14.2 图像显示评定最低条件应满足 a)~d)的要求:

- a) 最低亮度:250 cd/m^2 ;
- b) 最少显示灰度级:256;
- c) 最小可显示的亮度比:1:250;
- d) 最少显示像素数:2 000 000,像素尺寸 <0.3 mm。

8.14.3 存储不能降低原始图像的图像质量,原始图像存储前,仅允许与探测器校正相关的图像处理(如:偏置校正、增益校正和坏像素校正)。

8.14.4 原始图像存储格式宜为 DICONDE(见 GB/T 30821)或其他专用格式,存储的原始图像不能被更改。

8.14.5 若图像处理在图像评定之前,则处理后的图像不应作为原始图像。

8.14.6 应定期对原始图像进行备份,以便长期存储;如备份存储时对原始数据进行了压缩,所选择的压缩方式不应丢失原始数据。

8.15 图像质量

8.15.1 图像最低像质值

8.15.1.1 图像的对比度灵敏度,应满足表 A.1~表 A.4 规定。

8.15.1.2 图像的不清晰度与空间分辨率,应满足表 A.5 规定。

8.15.1.3 一般情况下,图像应同时满足对比度灵敏度和不清晰度与空间分辨率的规定。

8.15.2 最小归一化信噪比

8.15.2.1 图像的最小 SNR_N , 应满足表 3 和表 4 规定, 按 GB/T 35394 的要求测定。

8.15.2.2 SNR_N 值应在评定区内的较厚壁厚和图像 SNR_N 均匀区域中测定, 测定区为不小于 50 像素 \times 50 像素, 由于铸件表面粗糙度产生的噪声影响图像 SNR_N , 因此表 3 和表 4 中值仅为推荐值。

8.15.2.3 用户应规定图像允许的最小 SNR_N 值, 一般情况下, 应满足表 3 和表 4 的规定。表 3 和表 4 对不同的射线能量和透照厚度, 给出了图像允许的最小 SNR_N 值。

8.15.3 其他要求

图像标识应符合 8.9 的规定, 图像有效评定区不应存在干扰缺陷图像识别的伪像。

8.15.4 补偿规则 II (CP II)

补偿规则分为三级:

一级补偿: 提高单丝型像质值一级补偿双丝型像质值降低一级。例如, 要求值为 D12 (透照厚度 5 mm, B 级, 见表 A.5) 和 W16 (透照厚度 5 mm, B 级, 见表 A.1), 则认为 D11 和 W17 提供了等价的检测对比度灵敏度。

二级补偿: 提高单丝型像质值二级补偿双丝型像质值降低二级。

三级补偿: 一般情况下, 补偿应限制在最多二级补偿。对特定检测, 在保证检测灵敏度情况下, 经合同双方同意, 可提高单丝型像质值三级补偿双丝型像质值降低三级。

8.16 晶粒组织的影响

8.16.1 晶粒组织的衍射和吸收可导致图像产生衍射斑, 改变曝光技术能够判断是否为衍射斑, 如选择平移法、更高的射线能量、增加工件与探测器之间的距离。

8.16.2 当衍射斑致使图像无法评定, 经合同双方协商后可使用本标准规定之外的参数。

9 图像评定

9.1 一般要求

9.1.1 图像应由检测人员评定, 按合同、技术条件、图纸或者其他协议等规定的验收标准和等级, 确定铸件符合或不符合。

9.1.2 由检测人员或计算机软件进行图像缺陷识别评定。

9.1.3 原则采用静态数字图像评定, 若动态数字图像满足质量要求, 也可以使用。

9.1.4 为保证缺陷几何尺寸测量的准确性, 应采取已知尺寸的试件对图像尺寸测量及标定。

9.2 人工识别评定

9.2.1 在开始识别评定前, 评定人员要有足够的暗场适应时间。

9.2.2 评定人员对缺陷进行识别定性, 并利用辅助评定工具对缺陷进行定量分析评定。评定应在适当的窗宽和窗位下进行, 相应的值应根据评定区的信噪比大小确定。

9.2.3 采用铸件参考缺陷数字图像标准评定, 应将参考缺陷图像调整与检测图像相同的空间分辨率, 进行显示对比。

9.2.4 按评定区特征确定图像缩放比例, 在固定的缩放模式下进行评定。

9.3 自动识别评定

铸件自动检测时,缺陷自动识别评定的漏检率为零,误判率应低于5%;具有缺陷识别、标定、判定、铸件符合性等功能。

10 检测记录和报告

10.1 检测记录

应按照现场操作的实际情况,详细记录检测过程的有关信息和数据,至少应包括下列内容:

- a) 检测单位;
- b) 被检铸件:名称、编号、材质、热处理状况、检测部位、检测比例、厚度、表面状态、检测时机;
- c) 设备器材:名称、型号和主要技术特性参数;
- d) 检测技术:检测标准、工艺规范、技术等级、验收要求;
- e) 工艺参数:透照方式、像质计、滤波板、射线能量、曝光量、放大倍数、透照几何参数、图像处理参数等;
- f) 透照示意图;
- g) 检测数据;
- h) 图像评定:对比度灵敏度、空间分辨率、归一化信噪比、缺陷类别尺寸位置;
- i) 评定结果;
- j) 检测人员、资格;
- k) 检测日期。

10.2 检测报告

应依据检测记录出具,至少包含以下内容:

- a) 检测单位;
- b) 被检铸件:名称、编号、材质、热处理状况、检测部位、检测比例、厚度、表面状态、检测时机;
- c) 设备器材:射线机(型号、射线源尺寸)、探测器(型号、基本空间分辨率、归一化信噪比值、A/D转换、单帧积分时间、叠加帧数、像素尺寸等);
- d) 检测技术:检测标准、工艺规范、技术等级、验收要求;
- e) 工艺参数:透照方式、像质计、滤波板、射线能量、曝光量、放大倍数、透照几何参数、图像处理参数等;
- f) 透照示意图;
- g) 图像评定:对比度灵敏度、空间分辨率、归一化信噪比、缺陷类别和级别;
- h) 评定结论:评定结果、符合性;
- i) 偏离标准的特别协议;
- j) 检测和审核人员、资格;
- k) 检测和编制报告日期。

附 录 A
(规范性附录)
图像最低像质值

单壁透照且像质计置于源侧的图像丝型像质计对比度灵敏度见表 A.1。

表 A.1 丝型像质计对比度灵敏度

像质值 丝径/mm	公称厚度 t /mm	
	A 级	B 级
W19(0.050)	—	≤ 1.5
W18(0.063)	≤ 1.2	$> 1.5 \sim 2.5$
W17(0.080)	$> 1.2 \sim 2.0$	$> 2.5 \sim 4.0$
W16(0.100)	$> 2.0 \sim 3.5$	$> 4.0 \sim 6.0$
W15(0.125)	$> 3.5 \sim 5.0$	$> 6.0 \sim 8.0$
W14(0.160)	$> 5.0 \sim 7.0$	$> 8.0 \sim 12$
W13(0.20)	$> 7.0 \sim 10$	$> 12 \sim 20$
W12(0.25)	$> 10 \sim 15$	$> 20 \sim 30$
W11(0.32)	$> 15 \sim 25$	$> 30 \sim 35$
W10(0.40)	$> 25 \sim 32$	$> 35 \sim 45$
W9(0.50)	$> 32 \sim 40$	$> 45 \sim 65$
W8(0.63)	$> 40 \sim 55$	$> 65 \sim 120$
W7(0.80)	$> 55 \sim 85$	$> 120 \sim 200$
W6(1.00)	$> 85 \sim 150$	$> 200 \sim 350$
W5(1.25)	$> 150 \sim 250$	> 350
W4(1.60)	$> 250 \sim 350$	—
W3(2.00)	> 350	—

单壁透照且像质计置于源侧的图像阶梯孔型像质计对比度灵敏度见表 A.2。

表 A.2 阶梯孔型像质计对比度灵敏度

像质值 孔径/mm	公称厚度 t /mm	
	A 级	B 级
H2(0.160)	—	≤ 2.5
H3(0.200)	≤ 2.0	$> 2.5 \sim 4.0$
H4(0.250)	$> 2.0 \sim 3.5$	$> 4.0 \sim 8.0$
H5(0.320)	$> 3.5 \sim 6.0$	$> 8.0 \sim 12$
H6(0.400)	$> 6.0 \sim 10$	$> 12 \sim 20$

表 A.2 (续)

像质值 孔径/mm	公称厚度 t /mm	
	A 级	B 级
H7(0.500)	$>10\sim15$	$>20\sim30$
H8(0.630)	$>15\sim24$	$>30\sim40$
H9(0.800)	$>24\sim30$	$>40\sim60$
H10(1.000)	$>30\sim40$	$>60\sim80$
H11(1.250)	$>40\sim60$	$>80\sim100$
H12(1.500)	$>60\sim100$	$>100\sim150$
H13(2.000)	$>100\sim150$	$>150\sim200$
H14(2.500)	$>150\sim200$	$>200\sim250$
H15(4.000)	$>200\sim250$	—
H16(3.200)	$>250\sim320$	—
H17(5.000)	$>320\sim400$	—
H18(6.300)	>400	—

双壁透照且像质计分别置于源侧和探测器侧的图像丝型像质计对比度灵敏度见表 A.3。

表 A.3 丝型像质计对比度灵敏度——双壁透照

像质值 丝径/mm	透照厚度 w /mm			
	源侧	探测器侧	源侧	探测器侧
	A 级	A 级	B 级	B 级
W19(0.050)	—	—	≤ 1.5	≤ 1.5
W18(0.063)	≤ 1.2	≤ 1.2	$>1.5\sim2.5$	$>1.5\sim2.5$
W17(0.080)	$>1.2\sim2.0$	$>1.2\sim2.0$	$>2.5\sim4.0$	$>2.5\sim4.0$
W16(0.100)	$>2.0\sim3.5$	$>2.0\sim3.5$	$>4.0\sim6.0$	$>4.0\sim6.0$
W15(0.125)	$>3.5\sim5.0$	$>3.5\sim5.0$	$>6.0\sim8.0$	$>6.0\sim12$
W14(0.160)	$>5.0\sim7.0$	$>5.0\sim10$	$>8.0\sim15$	$>12\sim18$
W13(0.20)	$>7.0\sim12$	$>10\sim15$	$>15\sim25$	$>18\sim30$
W12(0.25)	$>12\sim18$	$>15\sim22$	$>25\sim38$	$>30\sim45$
W11(0.32)	$>18\sim30$	$>22\sim38$	$>38\sim45$	$>45\sim55$
W10(0.40)	$>30\sim40$	$>38\sim48$	$>45\sim55$	$>55\sim70$
W9(0.50)	$>40\sim50$	$>48\sim60$	$>55\sim70$	$>70\sim100$
W8(0.63)	$>50\sim60$	$>60\sim85$	$>70\sim100$	$>100\sim180$
W7(0.80)	$>60\sim85$	$>85\sim125$	$>100\sim170$	$>180\sim300$

表 A.3 (续)

像质值 丝径/mm	透照厚度 w /mm			
	源侧	探测器侧	源侧	探测器侧
	A 级	A 级	B 级	B 级
W6(1.00)	$>85\sim120$	$>125\sim225$	$>170\sim250$	>300
W5(1.25)	$>120\sim220$	$>225\sim375$	>250	—
W4(1.60)	$>220\sim380$	>375	—	—
W3(2.00)	>380	—	—	—

双壁透照且像质计分别置于源侧和探测器侧的图像阶梯孔型像质计对比度灵敏度见表 A.4。

表 A.4 阶梯孔型像质计对比度灵敏度——双壁透照

像质值 孔径/mm	透照厚度 w /mm			
	源侧	探测器侧	源侧	探测器侧
	A 级	A 级	B 级	B 级
H2(0.160)	—	—	≤ 1.0	≤ 2.5
H3(0.200)	≤ 1.0	≤ 2.0	$>1.0\sim2.5$	$>2.5\sim5.5$
H4(0.250)	$>1.0\sim2.0$	$>2.0\sim5.0$	$>2.5\sim4.0$	$>5.5\sim9.5$
H5(0.320)	$>2.0\sim3.5$	$>5.0\sim9.0$	$>4.0\sim6.0$	$>9.5\sim15$
H6(0.400)	$>3.5\sim5.5$	$>9.0\sim14$	$>6.0\sim11$	$>15\sim24$
H7(0.500)	$>5.5\sim10$	$>14\sim22$	$>11\sim20$	$>24\sim40$
H8(0.630)	$>10\sim19$	$>22\sim36$	$>20\sim35$	$>40\sim60$
H9(0.800)	$>19\sim35$	$>36\sim50$	—	$>60\sim80$
H10(1.000)	—	$>50\sim80$	—	—

图像的最大不清晰度和空间分辨率见表 A.5。

表 A.5 A 级和 B 级图像最大不清晰度和空间分辨率

透照厚度 w^a / mm	A 级应识别最小丝对值 和最大不清晰度/mm	A 级最大空间分辨率 SR_b^{image} /mm	B 级应识别最小丝对值 和最大不清晰度/mm	B 级最大空间分辨率 SR_b^{image} /mm
≤ 2.0	D12(0.125)	0.063	D13+ ^b (0.08)	0.04
$>2.0\sim5.0$	D10(0.20)	0.10	D13(0.10)	0.05
$>5.0\sim10$	D9(0.26)	0.13	D12(0.125)	0.063
$>10\sim24$	D8(0.32)	0.16	D11(0.16)	0.08

表 A.5 (续)

透照厚度 w^a / mm	A 级应识别最小丝对值 和最大不清晰度/mm	A 级最大空间分辨率 SR_b^{image} /mm	B 级应识别最小丝对值 和最大不清晰度/mm	B 级最大空间分辨率 SR_b^{image} /mm
>24~40	D7(0.40)	0.20	D10(0.20)	0.10
>40~55	D7(0.40)	0.20	D9(0.26)	0.13
>55~85	D6(0.50)	0.25	D9(0.26)	0.13
>85~150	D6(0.50)	0.25	D8(0.32)	0.16
>150~200	D5(0.64)	0.32	D8(0.32)	0.16
>200~250	D5(0.64)	0.32	D7(0.40)	0.20
>250~380	D4(0.80)	0.40	D7(0.40)	0.20
>380	D4(0.80)	0.40	D6(0.50)	0.25
<p>^a 对于双壁单影透照技术,应用公称厚度 t 替代透照厚度 w。</p> <p>^b D13+是指双丝型像质计图像中 D13 丝对所显示的调制传递函数曲线上的调制度值远大于 20%。</p>				

