

附件

ICS 19.100

CCS N78, H26

T/SCEPA

团 体 标 准

T/SCEPA 11101-2025

燃气轮机精密铸造叶片射线检测技术规范

Radiographic testing technical specification of gas turbine investment
casting blade

2025-02-11 发布

2025-02-11 实施

四川省电力行业协会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 检测人员资格 4

5 表面要求 4

6 检测时机 4

7 检测部位 4

8 检测设备和器材 4

9 校验 8

10 检测技术 8

11 底片评定及质量验收准则 20

12 其它事项 20

13 射线检测报告 20

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》的规定起草。

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。

本文件由四川省电力行业协会提出并归口。

本文件起草单位：东方电气集团东方汽轮机有限公司、西安交通大学、中国科学院金属研究所、西安热工研究院有限公司、成都和鸿科技股份有限公司、无锡透平叶片有限公司、上海电气燃气轮机公司、华瑞（江苏）燃机服务有限公司、安徽应流航源动力科技有限公司、南通海泰科特精密材料有限公司、江苏永瀚特种合金技术股份有限公司、中国人民解放军空军工程大学、陕西省特种设备检验检测研究院、陕西省计量科学研究院。

本文件主要起草人：方宇、艾松、杨天伦、廉德良、苏鹏飞、刘健、姜洪权、席雷、张炯、冉龙宏、骆光林、易军伟、陈培生、边帅、陈华、杨宏伟、聂祥樊、王瑜、曹峰、王佰昱、李永君、姜单、陈邱淳、张元林、林松。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至四川省电力行业协会（四川省成都市成华区望平街 135 号，610056）。

燃气轮机精密铸造叶片射线检测技术规范

1 范围

本文件规定了燃气轮机精密铸造透平叶片制造过程中射线检测必须满足的相关技术条件和管理要求。

本文件规定的射线检测方法和质量验收准则要求适用于制造阶段燃气轮机透平叶片的检测,在役检修阶段的透平叶片射线检测可参照本文件执行。

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,仅所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。

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 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 12604.2 无损检测术语 射线照相检测
- GB/T 19802 无损检测工业射线照相观片灯最低要求
- GB/T 23901.1 无损检测 射线照相底片像质 第1部分:线形像质计 像质指数的测定
- GB/T 25758.2 无损检测 工业X射线系统焦点特性 第2部分:针孔照相机射线照相方法
- GB/T 20129 无损用电子直线加速器
- GB/T 19348 无损检测 工业射线照相胶片
- GB 18871 电离辐射防护及辐射源安全基本标准
- ASTM E-94 射线照相检验指南
- ASTM E192 射线检测参考底片
- ASTM E446 射线检测参考底片
- ASTM E747 射线照相用线型像质指示器的设计、制造和材料分类的实施细则
- ASTM E1165 用针孔成像法测量工业X射线管焦点的标准方法
- ASTM E1742 射线检测标准规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件,其它术语参考GB/T 12604.2相关描述。

3.1

冷隔 Cold shut

金属液充型后,在金属液的交接处融合不好,而且在铸件中产生穿透的或不穿透的缝隙。

3.2

气孔（铸造） Gas holes (casting)

产生于铸件内部、表面或近表面，呈大小不等的圆形、长型及不规则形的光滑孔洞。通常为液态金属凝固或冷却过程中因气体溶解度下降，析出的气体来不及逸出而产生。

3.3

裂纹 Crack

裂纹是指材料局部开裂形成的缺陷。

3.4

夹杂 Inclusions

铸件内部或表面不规则形状或异物，可以是金属杂质、铸型砂或其他杂质的混合物镶嵌到铸件金属中。

3.5

缩孔 Shrinkage cavity

由于金属液收缩和凝固收缩所缩减的体积得不到补充，在铸件最后凝固的部位形成的宏观孔洞。

3.6

缩松 Shrinkage porosity

铸件最后凝固的区域没有得到液态金属或合金的补缩形成分散和细小的孔洞。

3.7

浇不足 Misrun

金属液未能充满铸型型腔而形成不完整的铸件。

3.8

残余型芯 Residual core

叶片内腔中未去除完的陶瓷型芯。

3.9

气孔（焊接） Gas holes (welding)

焊接时熔池中的气体未在金属凝固前逸出，残存于焊缝之中所形成的空穴。

3.10

夹渣 Slag

焊接过程中，残存在焊缝中的溶渣。

3.11

未熔合 Incomplete Fusion

焊缝金属与母材金属,或焊缝金属之间未熔化结合在一起的缺陷。

3.12

边蚀效应 Edge erosion effect

散射线影响射线底片影像边界的现象。

3.13

透照厚度 Penetrated thickness

射线照射方向上材料的公称厚度。多层透照时,透照厚度为射线通过的各层材料公称厚度之和。

3.14

有效透照部位

采用胶片射线检测技术对复杂叶片实施检测时,具备良好的透照成像条件,成像效果好,能够获得满意图像质量要求的部位,称为有效透照部位。

3.15

参考透照部位

采用胶片射线检测技术对复杂叶片实施检测时,因射线检测技术固有特点和叶片固有结构限制,受边蚀效应、投影叠加等因素的影响,不具备良好透照成像条件,成像效果差,不能够获得满意图像质量要求的部位,称为参考透照部位。

3.16

有效评定区

底片评定时,有效透照部位对应的底片投影区域,称为有效评定区。

3.17

参考评定区

底片评定时,参考透照部位对应的底片投影区域,称为参考评定区。

3.18

符号

下列符号适用于本文件。

F: 焦距,沿射线束中心测定的射线源与胶片之间的距离

U_g: 几何不清晰度

d: 射线源尺寸,采用制造方提供的公称尺寸或选用合适的标准测试出的有效焦点尺寸

T: 材料公称厚度

W: 透照厚度

b: 射线源侧工件表面至胶片的距离

4 检测人员资格

凡从事射线检测的操作人员和评定人员应经过培训, 应按照GB/T9445或其它国家、行业认可的相关等效标准要求进行培训和考核, 并取得相应考核机构颁发的射线检测资格证书, 方可从事与资格证书等级相适应的工作。

5 表面要求

铸件表面应经过外观检验合格。如果存在妨碍检测和影响底片上缺陷影像辨识的表面多余物、凹坑等应进行处理。

6 检测时机

应在最后可能产生缺陷工序后, 实施最终检测。宜在热处理后或认为最有利于缺陷检出的时机进行。除非在其它技术文件中有特殊规定。

7 检测部位

应对叶片铸件全体积实施检测, 或者按照技术文件规定的检测部位执行。

8 检测设备和器材

8.1 射线源

8.1.1 能量选择

应选用X射线源进行检测, X射线能量的选择必须达到本文件对黑度和像质计灵敏度的要求。对于镍基合金等材料X射线源能量推荐选择表1参数。能量选择时, 在满足底片影像质量情况下, 尽可能选择较低射线能量; 对于厚度差异大的变截面区域, 可适当提高射线能量。

表1 X射线设备能量等级与透照厚度范围

透照厚度范围 (mm)	X射线能量 (上限)
≤10	≤210keV
>10~25	>210keV~380keV
>25~50	>380keV~490keV
>50~100	>490keV~4MeV

8.1.2 焦点选择

为保证射线检测灵敏度，射线源有效焦点尺寸不宜过大，宜不大于 $5.5 \times 5.5 \text{ mm}$ 。使用前确认焦点尺寸，焦点尺寸可采用制造方提供的公称值，或者按ASTM E1165、GB/T 25758.2或GB/T 20129标准要求测试出的有效焦点尺寸。

8.2 胶片

应依据射线源能量水平、零件厚度、零件形状和影像质量选择射线胶片。工业用的感光材料（以下简称胶片）按照GB/T 19348.1《无损检测 工业射线照相胶片》第1部分：工业射线照相胶片系统的分类，分为6类：C1、C2、C3、C4、C5、C6；C1为最高类别，C6为最低类别。根据检测区域厚度范围和质量要求，单胶片透照时应选择等于或优于C5类胶片，其中排气边透照应选择等于或优于C4类胶片；双胶片透照时应选择等于或优于C4+C5或C5类双胶片，底片质量应符合10.8和10.9的要求。

胶片制造商应提供规定的全部数据的合格证书以及Ks剂量值和胶片处理方法（手工或自动，化学试剂的类型，显影时间和显影温度），同时还应提供胶片使用、保存以及使用限制（如有必要）所需的所有技术资料。

未使用的胶片，其保存应符合胶片制造商推荐的温度和湿度要求，避免任何电离辐射、可见光照射，并在有效期内使用。

胶片灰雾度应不超过0.3。应从购进胶片中按批抽样，采用与实际检测相同的暗室处理条件处理，然后进行灰雾度测量。经过测量合格的胶片如果6个月还没有使用完，应再次测量，以核查胶片储存是否符合要求。

8.3 增感屏

射线检测应使用金属增感屏或不用增感屏，增感屏应平整、无划伤、无污物。金属增感屏类型和厚度应按表2进行选择。

表2 金属增感屏的类型和厚度

射线种类	金属增感屏的类型和厚度/mm
X 射线 ($\leq 100 \text{ kV}$)	不用屏或用铅屏（前后） ≤ 0.03
X 射线 ($> 100 \text{ kV} \sim 150 \text{ kV}$)	铅屏（前后） ≤ 0.15
X 射线 ($> 150 \text{ kV} \sim 250 \text{ kV}$)	铅屏（前后） $0.02 \sim 0.15$
X 射线 ($> 250 \text{ kV} \sim 500 \text{ kV}$)	前铅屏 $0.02 \sim 0.20$ 后铅屏 $0.02 \sim 0.20$
X 射线 ($1 \text{ MeV} \sim 4 \text{ MeV}$)	钢或铜屏（前后） $0.25 \sim 0.70$ ，铅屏（前后） $0.5 \sim 2$

8.4 胶片暗袋

胶片暗袋或暗盒不应透光，所用材料不应影响底片质量和检测灵敏度。胶片暗袋或暗盒应定期检查有无漏光，如果发现胶片暗袋或暗盒漏光，应作修理或废弃。

8.5 滤波板、背散射防护板与遮蔽物

当低能散射线引起对比度降低而不能达到合同、采购图纸或技术规范对射线检测质量要求时，可使用滤波板。

背散射防护板一般由一层或几层铅板或铅橡皮组成，其厚度应 $\geq 4 \text{ mm}$ 。

薄铅板和铅箔、塑料或其它低密度非金属吸收材料均可用做散射遮蔽物，以使散射线或影像边蚀效应的影响最小化。工件边沿遮挡防护时，应避免操作不当产生底片影像边蚀效应。

8.6 像质计

8.6.1 像质计的类型

像质计选用与被检工件材质相同或对射线吸收性能相似的材料制作。Ni基高温合金叶片应选用Ni或Fe材料的像质计。

8.6.2 像质计的选用

应选用线型像质计。表3和表4分别列出了ASTM E747和GB/T 23901.1标准中线型像质计组别、线径和线号信息。其它国际或国内行业标准等同线径的像质计亦可选用。

表 3 线型像质计的组别、线径和线号（按 ASTM E747）

组别：A 组		组别：B 组	
线径（mm）	线号	线径（mm）	线号
0.08	1	0.25	6
0.10	2	0.33	7
0.13	3	0.41	8
0.16	4	0.51	9
0.20	5	0.64	10
0.25	6	0.81	11
组别：C 组		组别：D 组	
线径（mm）	线号	线径（mm）	线号
0.81	11	2.54	16
1.02	12	3.20	17
1.27	13	4.06	18
1.60	14	5.08	19
2.03	15	6.35	20
2.54	16	8.13	21

表 4 线型像质计的组别、线径和线号（按 GB/T 23901.1）

组别：W1-W7		组别：W6-W12	
线径（mm）	线号	线径（mm）	线号
3.20	W1	1.00	W6
2.50	W2	0.80	W7
2.00	W3	0.63	W8
1.60	W4	0.50	W9
1.25	W5	0.40	W10
1.00	W6	0.32	W11

0.80	W7	0.25	W12
组别: W10-W16		组别: W13-W19	
线径 (mm)	线号	线径 (mm)	线号
0.40	W10	0.20	W13
0.32	W11	0.16	W14
0.25	W12	0.125	W15
0.20	W13	0.10	W16
0.16	W14	0.080	W17
0.125	W15	0.063	W18
0.10	W16	0.050	W19

8.7 标记

8.7.1

透照部位的标记由识别标记和定位标记组成。标记一般由适当尺寸的金属铅(或其它适宜的重金属)制作的数字、拼音字母和符号等构成。底片上的标记应能清晰显示且不对底片的评定带来影响,标记的材料和厚度应根据被检工件的厚度来选择,应能保证标记影像不模糊,也不至于产生眩光。

8.7.2

识别标记一般包括工件编号、部位编号和透照日期,返修后的透照还应放置相应返修标记R1(返修一次)、R2(返修第二次),以此类推。允许采用预曝光方式获得相关识别标记,但应采取有效措施保证底片上的预曝光识别标记能可靠追踪到工件的相应被检区域且非识别标记区域被有效屏蔽,不被曝光。

8.7.3

定位标记用于识别工件被检部位与底片影像的对应位置,定位标记的影像应出现在底片上,且不影响对底片的评定,并能证实整个透照区完全被覆盖。在工件上应标划出定位标记的位置,在射线检测过程中,应保留该标划痕迹。如果整个工件采用一张胶片进行射线检测,或依据工件的形状特征在底片的影像可区分位置的情况,则可不需要定位标记。

8.8 黑度计及标准密度片

8.8.1

黑度计可测的最大黑度应不小于4.5,测量值的误差应不超过 ± 0.05 。

8.8.2

标准密度片应至少有8个一定间隔的黑度基准,且能覆盖0.3~4.5黑度范围。

8.9 观片灯

观片灯应有足够强的可变光源,以提供不同的亮度。观片灯亮度的要求,取决于射线照相底片的黑度。透过射线照相底片的亮度,应不小于:

- 30cd/m² (底片黑度 ≤ 2.5 时);
- 10cd/m² (底片黑度 > 2.5 时)。

表5列出了不同底片黑度时观片灯亮度应达到的最小值。观片灯应配备必要的遮光板，用来遮挡来自底片边缘或底片低黑度区域的光线，防止干扰底片评定。

表 5 观片灯亮度最小值要求

底片黑度	最小亮度值 cd/m²
1.0	300
1.5	1000
2.0	3000
2.5	10000
3.0	10000
3.5	30000
4	100000
4.5	300000

当观片灯修理或替换或换灯泡时都应重新测定此值。

8.10 显影液和定影液

显影液和定影液宜采用胶片厂家生产或推荐的冲洗配方或药剂，在按GB/T 19348.2 附录A经比较试验证明的条件下，也可以使用其它厂家的配方或药剂。显影液和定影液应在有效期内使用。

9 校验

9.1 标准密度片

标准密度片每两年内应至少进行一次校验。

9.2 黑度计

黑度计应按照ASTM E1742《射线检测标准规范》规定程序进行校验，至少每3个月用标准密度片进行一次校验（见附录A黑度计校验方法），每次校验后应填写校验记录。每次使用前或维修时（更换灯泡或光圈），黑度计均应进行校验，可不作校验记录。

9.3 观片灯

观片室里的光照度应暗而柔和，背景照明光不应妨碍射线底片的评定。在观片灯关闭的条件下，观片灯表面的环境光亮度不应超过30lux，每年至少核查一次。

观片灯每3个月校验一次，每次维修（更换灯泡）时均应进行校验。

10 检测技术

本文件的相关规定优先遵照执行，未注明部分借鉴国家或行业标准通用要求。

10.1 焦距

焦距应满足几何不清晰度(Ug)的要求。允许的几何不清晰度最大值见表6。

几何不清晰度(Ug)的定义为:

$$U_g = d \cdot b / (F - b)$$

公式中单位为mm。

表 6 允许的几何不清晰度最大值

材料厚度 T (mm)	几何不清晰度 Ug (mm)
<50.8	0.20
50.8-101.6	0.50
>101.6	0.75

10.2 透照方式

应当优先采用单壁透照技术，当单壁透照技术无法实施时，允许采用双壁或多壁透照技术。为了能充分发现精密铸造工艺可能出现的缺陷类型，应选择适宜的透照方向，并进行足够次数的曝光。透照布置时宜从较薄方向实施检测。检测有效透照部位时，胶片布置可覆盖参考透照部位，在一张底片上投影成像。透照方式应最大程度减小透照盲区。

对于典型结构的动叶、静叶推荐透照方式如下，如果能够保证有效检测叶片铸件全体积，也可采用其它适宜的透照方式。透照时，胶片尽可能贴近被检部位，保证影像质量。检测有效透照区时，底片布置覆盖参考透照区，保证参考透照区得到透照。参考透照部位需满足黑度要求，灵敏度以工艺试验确定，并在工艺卡中明确。参考透照部位宜在相对较好成像区域放置像质计（如具备放置的空间条件），按该区域的厚度选择像质计。

10.2.1

不带冠动叶片检测部位应包括叶根、平台、叶身部位。叶身、叶根为有效透照区，平台、叶根过渡区、叶身过渡区为参考透照区。可采用单壁单影透照方式，透照叶身时射线束垂直于叶顶孔轴线透照，用以判断叶顶孔是否堵塞。参考透照区可与有效透照区同时完成透照。不带冠动叶片透照示意图参见图1、图2。

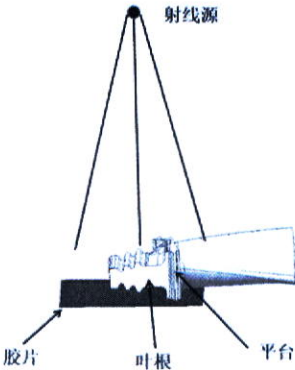


图 1 不带冠动叶叶根、平台透照示意图

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/498110140001007043>