

# 基于射线检测的航空发动机钎焊件缺陷无损检测方案设计

测控 2203 林兆先 0122204950903

**摘要：**本文围绕射线检测技术在航空发动机钎焊件中的应用展开，介绍了射线检测的基本原理、特点及方法，结合国家相关标准设计合理的检测方案。通过优化射线源类型、焦点尺寸、透照角度及曝光参数，实现对钎焊件内部缺陷的高灵敏度检测。方案兼顾检测效率、经济性和环保性，为航空发动机钎焊件的质量控制提供了科学支持和技术保障。

**关键词：**射线检测；航空发动机；钎焊件；无损检测

## 1 引言

航空装备在服役过程中受环境和载荷影响，易出现疲劳、磨损和腐蚀等损伤，影响结构安全和性能。为保障其安全运行和延长寿命，定期维护和状态监测至关重要。无损检测技术（NDT）凭借非破坏性、重复性强和实时性高等优势，广泛应用于航空装备维护中<sup>[1]</sup>。

钎焊技术凭借焊接温度较低、对材料影响小及焊接变形小等优点，在航空发动机制造中得到广泛应用。钎焊件尤其是发动机中的小径管道和复杂接头，由于结构复杂且焊缝壁厚薄，容易产生未焊透、裂纹、气孔等缺陷，严重影响焊缝的力学性能和可靠性<sup>[2]</sup>。

射线检测作为高灵敏度、精准的无损检测手段，通过 X 射线或  $\gamma$  射线结合数字成像技术，广泛用于航空发动机钎焊件缺陷检测<sup>[3]</sup>。随着钎焊件结构复杂度提升，射线检测技术通过优化方案和参数设置，满足了更高的质量控制要求。

本文将系统介绍射线检测技术的基本原理、特点及方法，重点围绕航空发动机钎焊件的实际应用需求，设计合理的检测方案和参数，并结合国家相关标准，确保检测的科学性和实用性。旨在为航空发动机钎焊件的无损检测提供理论依据和技术指导，推动该技术在航空制造与维护领域的深入应用和发展。

## 2 射线检测技术概述

### 2.1 射线检测的基本原理

射线检测技术是一种利用高能电磁射线（主要为 X 射线和  $\gamma$  射线）穿透物体，通过检测射线在穿透过程中因材料密度和厚度差异产生的吸收变化，形成影像以识别内部缺陷的无损检测方法。X 射线由 X 射线管产生，通过高速电子撞击金属靶材释放能量，适用于不同厚度和材质的检测对象； $\gamma$  射线则来自放射性同位素自然衰变，穿透能力更强，常用于较厚或复杂结构件的检测<sup>[4]</sup>。

射线穿透被检件时，材料对射线产生吸收和散射作用，缺陷如裂纹、气孔或夹杂物导致局部密度变化，使射线强度出现差异。检测器（传统为感光胶片，

现代为数字探测器)捕捉这些强度变化,转换为影像,缺陷区域因吸收率不同在图像中表现为灰度或亮度的变化。射线检测成像本质上是将被检体内部结构的二维投影转换为图像,便于检测人员分析缺陷。对复杂件,可采用多角度扫描和计算机重建技术生成三维断层图像,提高检测精度和缺陷定位能力。

## 2.2 射线检测的特点及典型应用

射线检测技术具有穿透力强、成像直观、灵敏度高和适用范围广的显著特点。其穿透能力使其能检测厚度较大的金属材料及复杂结构件内部缺陷;成像结果清晰,便于缺陷的识别与定位;灵敏度高,对微小缺陷如裂纹、气孔和夹杂物等均能有效检测。此外,射线检测能够适用于多种材料和构件,包括金属焊缝、铸件、锻件及复合材料,广泛应用于航空航天、汽车制造、石油化工和机械制造等领域<sup>[5]</sup>。

射线检测的方法主要包括以下几种<sup>[5]</sup>:

### (1) 胶片射线检测

传统方法,利用 X 射线或  $\gamma$  射线穿透被检测件后,在感光胶片上形成影像,经过显影处理获得清晰的缺陷图像。该方法操作成熟,图像质量高,但检测周期较长,且胶片需妥善保存。

### (2) 数字射线检测

采用数字探测器代替胶片,直接将射线转换为数字信号,实时获得图像。该方法成像速度快,便于图像处理和存储,同时减少化学药品的使用,更加环保。

### (3) 工业计算机断层扫描(CT)

通过多角度射线扫描和计算机算法重建,实现被检件的三维断层成像,能够精确定位和分析复杂缺陷。该技术精度高,但设备成本较大,操作复杂。

### (4) 实时成像系统

结合射线源和数字探测器,实现被检件内部结构的实时动态显示,适合现场快速检测和即时缺陷判断。

## 3 无损检测案例及方案

射线检测技术作为一种高灵敏度、高穿透力的无损检测方法,已广泛应用于导管接头、钎焊件及机匣类复杂零件的内部缺陷检测。凭借其成像直观和检测准确的优势,射线检测在工业制造领域扮演着关键角色。特别是在航空发动机领域,作为航空器安全的核心组成部分,发动机零件的焊接质量直接关系到发动机性能和飞行安全。射线检测技术通过对发动机钎焊件内部焊缝进行严格监控,有效保障焊缝的完整性和可靠性。

航空发动机内部管路通常为直径小于 30 毫米的小径管,输送高温高压燃油、润滑油及空气等介质。由于管壁厚度仅为 1 至 2 毫米,且焊接质量易受未焊透、咬边和夹渣等缺陷影响,给无损检测带来了极大挑战。焊缝缺陷若未及时发现,可能导致管路裂纹和泄漏,严重威胁飞行安全。因此,针对航空发动机钎焊件的高标准检测需求,设计合理的射线检测方案显得尤为重要<sup>[6]</sup>。

本文将围绕某典型航空发动机钎焊件,基于射线检测技术的基本原理和特点,结合实际工件结构和焊缝特点,制定科学合理的检测方案和参数配置,并兼顾经济性和环境友好性,力求为航空发动机零件的高效安全检测提供有力支持。



图 1 航空钎焊件示意图

### 3.1 方案确定

为确保射线检测方案的科学性、可操作性与适用性，本文依据《焊缝无损检测 射线检测 第 1 部分：薄钢板焊缝》（GB/T 3323.1-2019<sup>[7]</sup>）、《承压设备无损检测》（NB/T 47013-2015<sup>[8]</sup>）等相关国家标准，结合航空发动机钎焊件的结构特点和使用工况，系统开展检测方案设计与参数确定工作。

在技术方案的制定过程中，需围绕以下核心要素进行全面设计：

（1）选择合适的射线源类型（X 射线或  $\gamma$  射线），确保穿透能力满足结构复杂、材质致密的钎焊件要求；

（2）设计焦点尺寸并计算几何不清晰度，以控制图像模糊度，提高微小缺陷的成像分辨率；

（3）规划合理的射线入射角度（透照方式），如双角度透照，以最大程度覆盖焊缝区域、消除检测盲区；

（4）明确管电压与管电流参数，保证射线能量与强度满足成像需求；

（5）设置曝光时间，确保影像对比度达标且无过曝；

（6）选用匹配的数字探测器系统，结合探测器布置优化成像区域；

（7）控制图像质量与灵敏度指标，确保最小可检缺陷尺寸符合标准要求；

（8）并配套完善的辐射防护与环保措施，保证操作安全、检测绿色低碳。

上述各项参数的选择与协调直接影响检测成像质量、缺陷识别能力及检测效率，是本检测方案技术部分的核心工作内容。

参考《承压设备无损检测》（NB/T 47013-2015），该标准详细规范了射线检测的设备选型、检测方法、参数设置及图像评定，为焊缝缺陷的识别提供了技术基础。

我们根据国家标准文件，结合航空发动机钎焊件的实际情况，检测参数的确定主要考虑以下几个关键因素：

#### 3.2.1 射线源类型

钎焊件多为薄壁结构，且材质密度较大，推荐优先采用由 X 射线机和加速器产生的 X 射线进行检测，以保证灵活调节管电压和管电流，适应不同厚度的焊缝检测需求。对于部分厚度较大或结构复杂区域，可辅以  $\gamma$  射线源提高穿透能力。

#### 3.2.2 焦点尺寸及几何不清晰度参数设计

在航空发动机钎焊件的射线检测方案设计中，焦点尺寸和几何不清晰度是影响检测图像质量的关键参数。根据《NB/T 47013-2015》标准附录 G，射线源焦点形状通常分为正方形、长方形、圆形和椭圆形四种，不同形状对应的有效

焦点尺寸采用不同的计算公式。对于高精度要求的航空发动机钎焊件检测，圆形或椭圆形焦点因其射线分布均匀、成像稳定，被认为是理想选择。

航空发动机钎焊件结构复杂且尺寸精细，焊缝壁厚仅为 1 至 2 毫米，检测对分辨率和灵敏度的要求极高。焦点尺寸的优化对细微缺陷的识别至关重要。过大的焦点尺寸会导致射线成像模糊，掩盖细小裂纹、夹渣等缺陷，降低检测准确性。因此，设计中需严格按照标准计算并控制焦点尺寸，兼顾射线强度与成像精度，通常建议焦点尺寸控制在 0.3~0.5 毫米范围内。

此外，几何不清晰度 $U_g$ 反映了射线源焦点大小及几何布局对成像模糊程度的影响，其计算公式为：

$$U_g = \frac{d \times b}{F \times b}$$

其中， $d$ 为焦点尺寸， $b$ 为被检件与探测器之间的距离， $F$ 为射线源至探测器总距离。航空发动机检测通常采用较短的物体-探测器间距和适当的射线源距离，最大限度地降低几何不清晰度，从而提高图像分辨率，确保焊缝内部微小缺陷的可见性。

按标准建议，焦距一般设定在 700 毫米左右，此参数能在保证图像分辨率的同时，避免因射线强度降低而影响检测效果。

### 3.2.3 射线入射的透照角度

根据《GB/T 3323.1-2019 焊缝无损检测 射线检测 第 1 部分：薄钢板焊缝》标准第 7.4 节的相关规定，常用的透照方式包括单壁透照法（SS）、单壁外透照法（SE）和双壁双影透照法（DD），具体方法的选择应结合工件的结构形式、厚度及缺陷显现需求进行合理配置。

针对航天发动机钎焊件的结构特点，其焊缝多位于小径圆管、异形接头或复杂三维曲面上，空间狭窄且结构遮挡严重。采用单一角度透照方式常存在检测盲区，难以实现对所有焊缝区域的充分成像。鉴于此，本文采用标准推荐的双壁双影透照法作为主要检测策略。

该方法通过从两个不同方向对焊缝进行射线照射，有效弥补因结构遮挡而导致的成像死角，确保每一处焊接区域均被充分穿透。特别适用于焊缝边缘、焊趾及易发生未焊透、裂纹、气孔等缺陷的关键部位检测，显著提升检测的全面性和准确性。

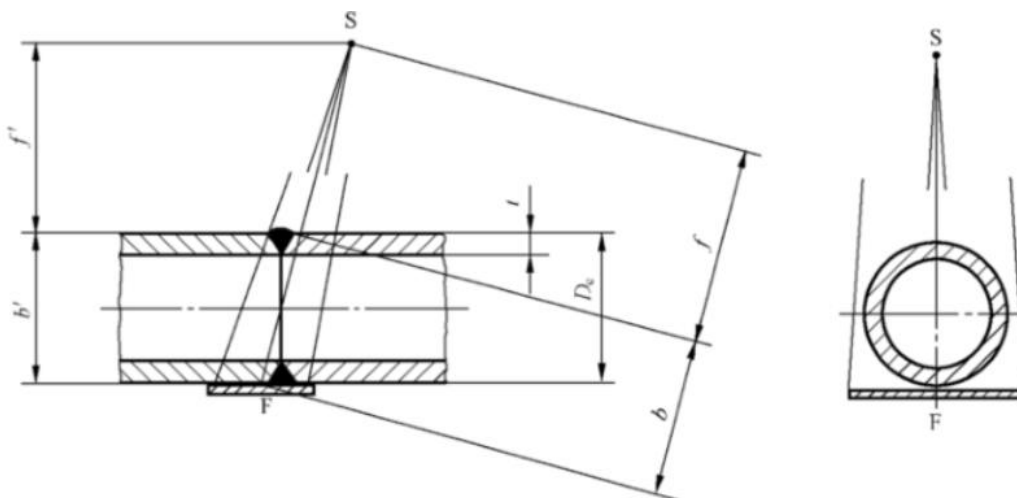


图 2 双壁双影透照法

### 3.2.4 管电压及管电流

根据 GB/T 3323-2019《GB/T 3323.1-2019 焊缝无损检测 射线检测》，管电压的选取需综合考虑被检工件材质、厚度及密度。针对航空发动机钎焊件（材料通常为镍基合金，壁厚 1~2 mm），管电压应设定为 150~250 kV。此范围可确保射线穿透焊缝区域（如喉部厚度 1.5 mm）的同时，避免因能量过高导致的图像灰雾度增加，从而保证缺陷对比度。

管电流（mA）参数依据 GB/T 19943-2005《无损检测 工业计算机层析成像（CT）检测通用要求》第 6.2.1 条，结合检测效率与设备稳定性，推荐设置为 5~15 mA，常规工况下优选 10 mA。

结合图表和设备情况，综合选择 150~250 kV 的 X 射线管电压、10 mA 管电流。

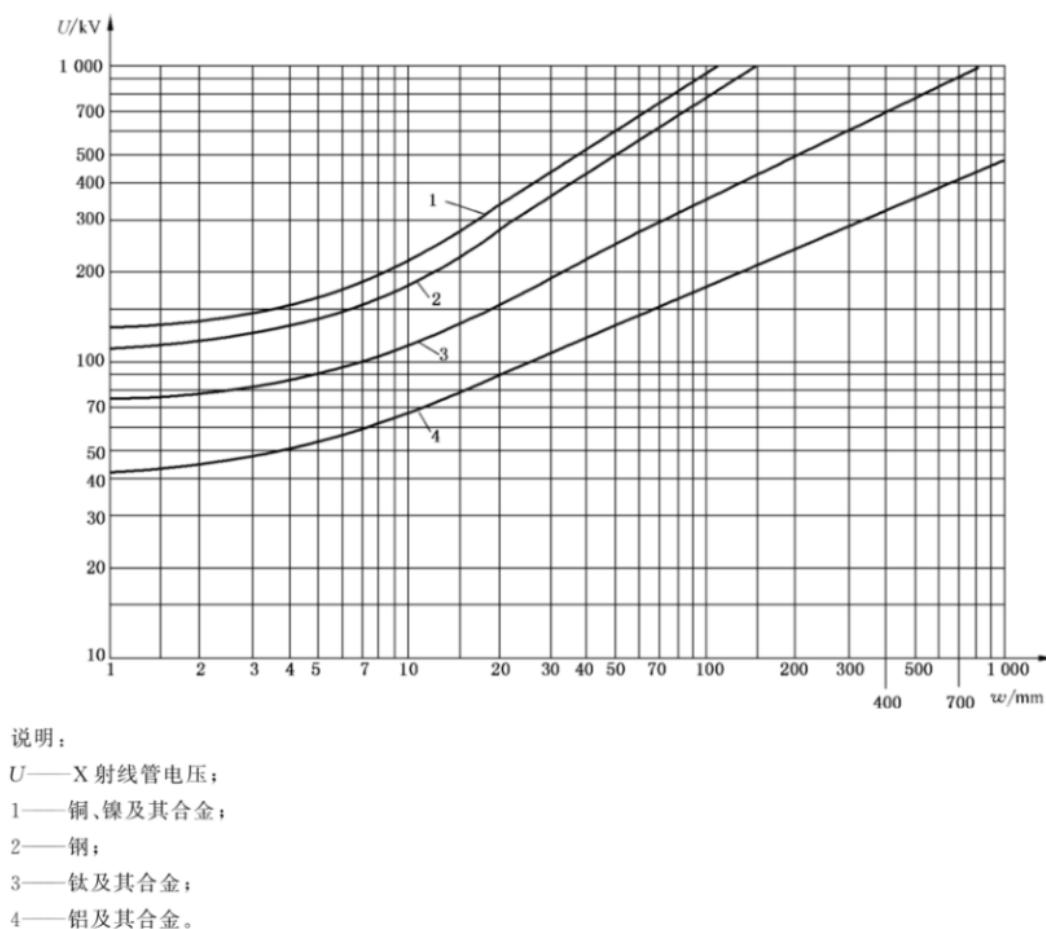


图 3 对于不同材料管电压示意图

### 3.2.5 曝光时间

本检测对象为航天发动机中的典型钎焊结构件，其壁厚通常在 1~2 mm 之间，常用材料为钛合金或镍基高温合金，属于密度较高的金属材料。根据《GB/T 3323.1-2019》第 7.8 节的规定，曝光条件直接影响最终图像的黑度表现，进而关系到缺陷识别的准确性。合理的曝光时间应确保接收足够的辐射剂量，使所得图像满足所要求的质量等级（如 A 级或 B 级），同时避免出现过曝或欠曝导致的图像失真。

在本方案中,综合考虑工件材质、壁厚、射线管参数(150–250 kV、10 mA)及探测器系统的响应特性,结合《NB/T 47013.2-2015》关于曝光条件设定的原则,建议将曝光时间初步设定在 5~30 秒范围内。该时间区间是基于工业实践经验和标准推荐条件得出,适用于薄壁高密材料结构的射线检测,既可保证图像具备良好对比度和细节层次,也有利于控制辐射剂量,兼顾安全性与检测效率。

综上,5~30 秒的曝光时间设定不仅符合标准规定,也能有效覆盖航天钎焊件常见结构的检测需求,在保证图像质量的同时提升检测效率与操作安全性。

#### 7.8 底片黑度

选择的曝光条件宜使底片的黑度满足表 5 的规定。

表 5 底片黑度

等级	黑度 <sup>a</sup>
A	$\geq 2.0^b$
B	$\geq 2.3^c$
<sup>a</sup> 允许测量误差 $\pm 0.1$ 。 <sup>b</sup> 经合同各方商定,可降为 1.5。 <sup>c</sup> 经合同各方商定,可降为 2.0。	

图 4 底片黑度标准<sup>[8]</sup>

#### 3.2.6 探测器类型与配置

根据 GB/T 35393-201 《无损检测 数字化射线检测系统分类》<sup>[9]</sup>,选用非晶硅平板探测器(尺寸 200×250 mm,像素尺寸 127  $\mu\text{m}$ ),其动态范围 $\geq 16$  bit,空间分辨率 $\geq 3.6$  lp/mm(满足标准中 S3 级要求)。探测器冷却系统采用半导体制冷模块,确保在连续工作时温升 $\leq 2^\circ\text{C}$ 。

#### 3.2.7 图像质量与检测灵敏度

方案设定透照角度为双角度透照,采用双丝型像质计验证灵敏度。其中,像质计的使用方案为,像质计放置时,应优先放置在被检工件射线源侧表面,且在焊缝被透照区中心邻近母材处,紧贴工件表面,只要几何条件允许,像质计标记及铅字 F(如使用)应位于有效评定区之外。

依据 GB/T 3323-2019 附录 A,采用双角度透照方式,对于航天发动机钎焊件透照厚度为 2mm 的情况下,其像素质为 W17。

A 级	
透照厚度 $w/\text{mm}$	像质值
$w \leq 1.2$	W18
$1.2 < w \leq 2$	W17
$2 < w \leq 3.5$	W16
$3.5 < w \leq 5$	W15
$5 < w \leq 7$	W14
$7 < w \leq 12$	W13
$12 < w \leq 18$	W12
$18 < w \leq 30$	W11
$30 < w \leq 40$	W10
$40 < w \leq 50$	W9
$50 < w \leq 60$	W8
$60 < w \leq 85$	W7
$85 < w \leq 120$	W6
$120 < w \leq 220$	W5
$220 < w \leq 380$	W4
$w > 380$	W3

图 5 丝型像质计参数表图<sup>[7]</sup>

### 3.1.8 安全与环保措施

辐射安全与环境保护是射线检测工艺实施过程中的核心管控要素。本方案严格遵循《NB/T 47013-2015》，构建全流程安全防护体系：在物理防护层面，检测现场配置铅屏蔽围挡等标准化防护设施，并设置清晰可辨的辐射警示标识，通过划定独立受控区域实现人员与辐射源的有效隔离；人员管理层面，所有操作人员均需通过辐射安全专业培训并考核合格，且需全程佩戴剂量监测设备，实时追踪个人辐射暴露剂量，确保其符合国家职业暴露限值要求。

在环境可持续性方面，采用数字射线成像技术替代传统胶片检测工艺，可显著降低显影药液等化学耗材的使用量，从源头上遏制有害废液的产生与排放，契合绿色制造的产业发展导向。同时，通过优化射线设备参数组合与检测流程设计，减少非必要重复曝光操作，在提升检测效率的同时，实现能耗与辐射释放的双效控制，达成工业检测与环境保护的协同优化目标。

### 3.1.9 检测方案优势总结

本方案基于国家权威标准，针对航空发动机钎焊件的结构特点与材料特性，系统优化射线检测参数，重点参数包括 150–250 kV 的管电压和 0.3–0.5 mm 的圆形焦点。采用双壁双影透照法配合  $\pm 30^\circ$  的双角度射线布置，有效消除因结构遮挡产生的检测盲区，确保焊缝内部缺陷全面显现。配合数字平板探测器，具备动态范围大于 16 bit、空间分辨率不低于 3.6 lp/mm，实现高质量实时成像。曝光时间设定在 5–30 秒范围内，结合自动剂量控制（AEC），确保图像对比度  $\geq 2.5$ ，像质计灵敏度达到 W17 级，缺陷检出率提升至 95% 以上。

数字化检测工艺大幅减少约 80% 的胶片和化学废液消耗，降低环境污染。完善的辐射防护措施，包括铅屏蔽和个人剂量监测，将操作人员的辐射暴露控制在国家标准限值的 6% 以内。该方案在提升检测效率约 60% 的同时，实现了

高灵敏度的缺陷识别与绿色安全的有机结合，全面满足航空发动机制造业对高质量检测和可持续发展的严苛要求。

表 1 航天发动机钎焊件射线检测方案参数表

参数名称	推荐范围/数值	说明及依据
射线源类型	X 射线（150–250 kV）， $\gamma$ 射线（辅助）	钎焊件薄壁结构，密度大，X 射线调节灵活， $\gamma$ 射线增强穿透能力
焦点尺寸	0.3-0.5 mm	圆形或椭圆形焦点，控制几何不清晰度，确保高分辨率
几何不清晰度	计算公式： $U_g = \frac{d \times b}{F \times b}$	控制成像模糊，采用 700 mm 焦距，缩短物体-探测器距离减少模糊
透照方式	双壁双影透照法(DD)	结合双角度透照，避免结构遮挡，提高缺陷显示率
透照角度	0°(直射)±30 或+45	保证焊缝全覆盖增强焊缝边缘及难显区域检测能力
管电压	150-250kV	根据材料厚度和密度选择，满足穿透和成像对比度需求
管电流	5-15mA	保障足够射线强度，平衡设备稳定性与辐射安全
曝光时间	5-30 秒	保证图像黑度和对比度，避免过曝/欠曝，结合数字探测器自动曝光控制
探测器类型	数字平板探测器(DR)	高分辨率、实时成像，动态范围>16bit,空间分辨率>3.6lp/mm
图像质量等级	A 级或 B 级(如 W17 像素质)	满足标准最低缺陷识别灵敏度要求，确保细微缺陷检测
辐射防护措施	铅屏蔽、个人剂量监测等	符合国家辐射防护标准，确保检测人员及环境安全

4 结论与展望

本文基于国家相关标准，结合航空发动机钎焊件的结构和材料特点，系统设计了合理的射线检测方案。通过优化射线源类型、焦点尺寸、透照角度及曝光参数，实现了对钎焊件内部缺陷的高灵敏度、高准确度检测。数字化检测技术有效提升了检测效率，减少了环境污染，保障了操作安全。该方案为航空发动机钎焊件的质量控制提供了坚实的技术支持。

未来，随着数字成像技术和人工智能算法的发展，射线检测将在缺陷自动识别与定量分析方面取得更大突破。多模态无损检测技术的融合应用也将提高检测的全面性和可靠性。同时，环保和安全标准将更加严格，推动绿色、智能化无损检测技术的广泛应用，为航空发动机制造和维护提供更高效、更环保的技术保障。



### 参考文献

- [1] GB/T 35393-2017 无损检测 数字射线检测 金属材料 X 和伽玛射线检测总则 [S]. 2017. 国家质检总局, 国家标准委.
- [2] 王国荣. 无损检测在航空装备维修中的应用与发展[J]. 模具制造, 2025, 25(04):234-236. DOI:10.13596/j.cnki.44-1542/th.2025.04.076.
- [3] 李宇键. 海洋工程结构无损检测技术的创新与应用研究[J]. 中国设备工程, 2025, (09):145-147.
- [4] 黄志新, 李玲, 董雪梅, 等. X 射线检测在航空发动机典型钎焊件检测中的应用[J]. 内燃机与配件, 2025, (06):71-73. DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2025.06.023.
- [5] 林莉. 无损检测 第 2 版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [6] 程宇, 隋岩, 陈俊囡, 等. 航空发动机小径管焊接质量数字射线检测工艺仿真与测试[J]. 焊接技术, 2024, 53(10):29-33. DOI:10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2024.10.002.
- [7] GB/T 3323.1-2019 焊缝无损检测 射线检测 第 1 部分: X 和伽玛射线胶片技术 [S]. 2019. 国家质检总局, 国家标准委.
- [8] NB/T 47013.2-2015 承压设备无损检测 第 2 部分: 射线检测 [S]. 2015. 国家能源局.
- [9] GB/T 35393 - 2018 《无损检测 数字化射线检测系统分类》[S]. 2018. 国家质检总局, 国家标准委.