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[1]。

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[2] 。

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γ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[3]。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γ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；γ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[4]。

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[5]。

射线检测的方法主要包括以下几种[5]：

（1）胶片射线检测

传统方法，利用X射线或γ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[6]。

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[7]）、《承压设备无损检测》（NB/T 47013-2015[8]）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γ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、检测绿色低耗。

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γ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：

其中，为焦点尺寸，为被检件与探测器之间的距离，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。

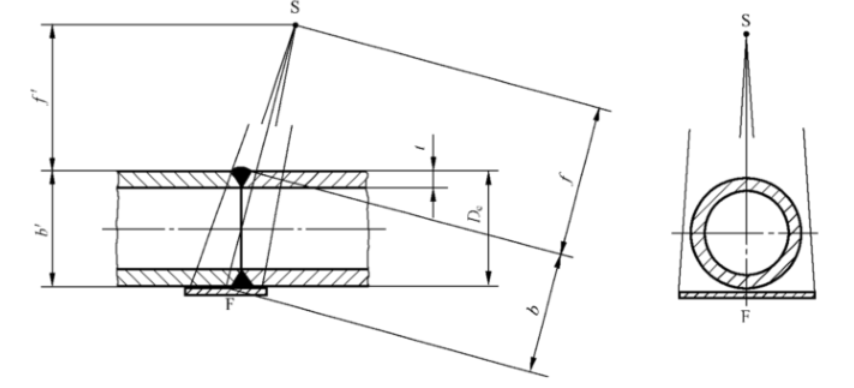


图2 双壁双影透照法

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。**

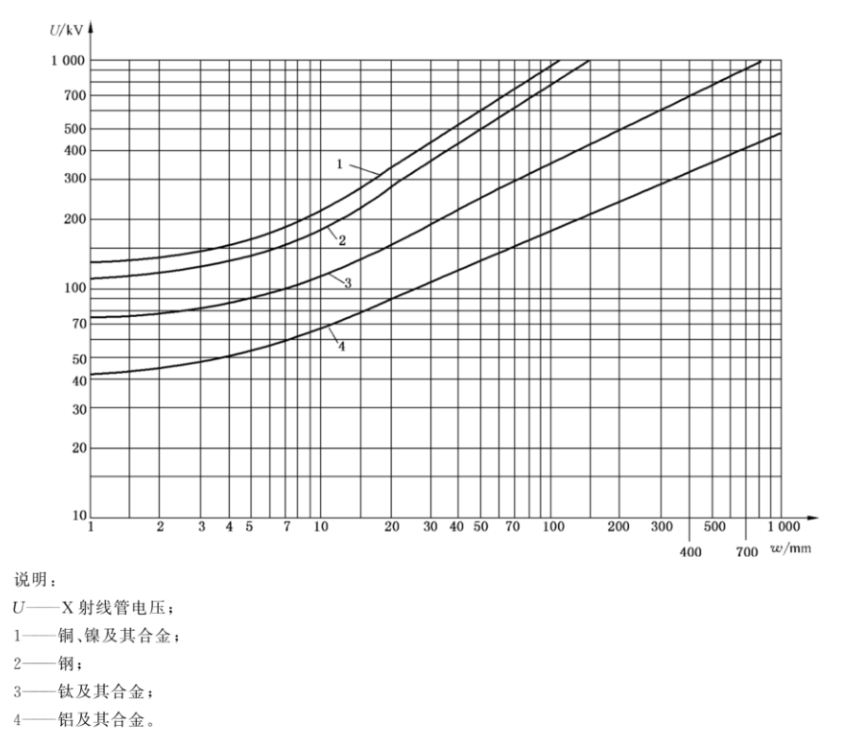


图3 对于不同材料管电压示意图

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。

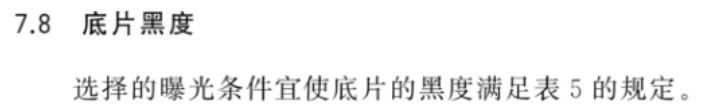


图4 底片黑度标准[8]

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》[9]，选用非晶硅平板探测器（尺寸200×250 mm，像素尺寸127 μm），其动态范围≥16 bit，空间分辨率≥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≤2℃。

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。



图5 丝型像质计参数表图[7]

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±30°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≥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），γ射线（辅助） | 钎焊件薄壁结构，密度大，X射线调节灵活，γ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： | 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.