

# 第六讲 射线照相标准与射线 照相检验质量控制

郑世才

(新立机器厂, 北京 100039)

## RADIOGRAPHIC STANDARDS AND QUALITY CONTROL OF RADIOGRAPHIC TESTING

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

### 1 射线照相标准概述

目前, 国内外制订的射线检验标准, 按内容可分为射线照相检验技术(或方法)、射线照相检验质量控制、射线照相检验参考底片、射线照相检验的术语和器材等方面的标准。美国材料试验学会(ASTM)关于射线照相方面的标准共计55项(1998年版), 其中参考底片类标准15项、射线照相检验质量控制方法标准1项、射线检验试验方法标准14项、射线检验操作方法标准13项以及射线检验导则标准12项。ASTM是世界上射线检验标准制订得最多的标准体系, 在试验方法标准、操作方法标准和导则标准中, 不仅有常规射线照相标准, 还有实时成像、CT和康普顿散射成像标准。

一般射线照相检验人员需要深入理解和掌握的主要是射线照相检验技术(或方法)标准和射线照相检验质量控制标准。射线照相检验技术(或方法)标准一般包括下列内容:

- (1) 标准的适用范围
- (2) 射线照相检验技术规定
  - (a) 射线胶片的分类和选用
  - (b) 主要透照参数(射线能量、透照焦距和曝光量)的确定
  - (c) 透照布置和辅助措施(如增感和各种控制散射线的措施)要求
  - (d) 射线照相灵敏度要求
  - (e) 暗室处理技术要求
  - (f) 评片技术要求
- (3) 射线照相检验质量控制要求
  - (a) 人员技术资格

- (b) 设备、器材质量和工作环境的要求
- (c) 射线照相技术控制方法
- (d) 射线照相(底片)质量要求
- (e) 技术文件和资料质量要求

射线照相检验技术和射线照相检验质量控制的内容常常是连贯的, 因此, 在射线照相检验技术标准中总是包括主要的质量控制内容。

### 2 射线照相技术级别

#### 2.1 概述

射线照相检验技术(或方法)标准所规定的核心内容是射线照相技术, 一般包括选用的射线胶片类型、透照参数, 主要是射线能量、透照焦距和曝光量、透照布置和辅助措施(如增感和各种控制散射线的措施)。射线照片影象质量, 主要是底片黑度和射线照相灵敏度。

这些方面的规定限定了所采用的射线照相检验技术, 因而也限定了射线照相检验的结果。理论上, 规定了射线照相技术选用的胶片、透照参数和有关的辅助措施, 就应该限定了能够得到的射线照片质量, 或射线照相检验结果, 但实际上, 由于射线照相过程的复杂性, 一些因素的影响不可能受到严格控制, 因此, 在射线照相技术中, 还必须对底片黑度和象质计灵敏度作出限定性规定。贯穿在射线照相技术规定中的线索是射线照相技术级别。60年代以来, 国内外重要射线照相方法标准已明确提出了射线照相技术级别概念, 如在国际标准化组织(ISO)标准中, 其第4条的标题常为“射线照相技术级别”。现在, 多数射线照相标准将射线照相检验技术分为两个级别, 即A级: 一般灵敏度技术; B级: 高灵敏

度技术。并从上述四个方面对不同级别的射线照相技术作出规定,其中主要是:

(1) 胶片

规定应采用的胶片类型。

(2) 基本透照参数

(a) 射线能量 规定不同能量射线适宜的透照厚度,对常见的 400kV 以下 X 射线规定允许的最高透照电压与透照厚度的关系。

(b) 焦距 规定最小焦距值与透照厚度的关系,或不同厚度、不同技术级别的几何不清晰度。

(c) 曝光量 推荐了应采用的最低曝光量。

(3) 射线照片质量

(a) 黑度 规定射线照片允许的黑度范围。

(b) 射线照相灵敏度 规定相应于不同厚度范围射线照片应达到的射线照相灵敏度。

以上这些可作为理解射线照相检验方法标准的基本线索。表 6-1 是国际标准化组织标准 ISO 5579 关于射线照相技术级别的典型规定。射线照相技术各部分规定的关系如图 6-1。

表 6-1 ISO 5579—85 标准的有关规定(钢)\*

技术级别	胶片	透照电压 最高值 v/kV	焦距 最小值	黑度
A	中速中粒	50T <sup>0.56</sup>	f/d 7.5T <sup>2/3</sup>	1.5
B	慢速细粒		f/d 15T <sup>2/3</sup>	2.0

\* 象质计灵敏度:按 T 分段,分别规定应识别的最小丝径。  
T——待测工件厚度,mm

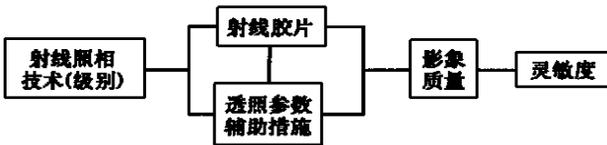


图 6-1 射线照相技术各部分规定的关系

技术级别规定的基础是胶片。

按成像理论,为了在射线照片上识别一个细节,该细节影象的对比度  $\Delta D$  必须满足的条件之一是

$$\Delta D \geq (3 \sim 5) \sigma$$

式中  $\sigma$ ——影象的颗粒度

$\sigma$  是胶片颗粒尺寸、颗粒尺寸大小的随机分布、单位面积中颗粒数的随机性及射线量子吸收的随机性的反映。因此,即使在非常均匀的曝光下,所得到的影象也具有一定的颗粒性。影象的颗粒度主要取决于胶片本身的特性,也与射线能量、曝光量和暗室处理过程有关。影象颗粒度的上述性质说明,对于形成的射线照片的影象质量,胶片自身的特性提

供了可能达到的最高水平,透照中所采用的技术因素,是在这个可能达到的基础上进行控制和调整,以达到所要求的影象质量。不能期望通过控制和调整射线照相的技术因素得到超过胶片特性限定的影象质量,即在适当的透照参数等条件下,较细颗粒的胶片可以得到更好的影象质量。正因为如此,在射线照相标准中对射线照相技术级别首先规定的是应选用的胶片类型。

基本透照参数是技术级别规定中对技术因素的基本规定,它是影象质量的技术保证。显然,射线能量是透照参数中最重要的参数,因为它直接关系到射线的线衰减系数、散射比和射线照相不清晰度等,选取得正确与否,将直接影响射线照片的影象质量。焦距是另一基本透照参数,它直接关系到射线照相的几何不清晰度。约从 70 年代起,英国射线照相标准明确提出,应从确立胶片固有与几何不清晰度的关系规定焦距值,即应使基本透照参数能量条件和几何条件相互协调,近年来有文献强调了这种观点。基本透照参数中的曝光量直接关系到射线照片影象的信噪比,也即影象的颗粒度。但是,曝光量却是射线照相技术级别中难以严格规定的透照参数,特别是对 400kV 以下的 X 射线,造成这种情况的原因至少有三个方面: 同一毫安·分(mA·min)时,不同的 X 射线机由于高压发生波形不一,因而产生的 X 射线照射率也不同,即使是同一 X 射线机,在不同的透照电压时产生的 X 射线照射率也不同。随着 X 射线机使用期的加长,其照射率还会不断改变。X 射线管辐射的 X 射线是连续谱,不同谱对射线胶片的感光能力不同。X 射线管辐射的 X 射线的能谱分布,又随着穿透厚度而改变。这些原因使得至今难以对 X 射线的曝光量作出严格的规定。

在技术级别规定中,射线照片质量主要是底片黑度和灵敏度。黑度规定是对底片对比度和影象颗粒度的控制。灵敏度规定明确限定了底片必须达到的显示细节的要求。

技术级别的这些规定,从不同方面为底片影象质量达到一定要求提供了保证,在执行射线照相标准时应严格遵守。

2.2 技术级别规定的变化

不同的射线照相检验标准对技术级别的规定存在一些差异,个别方面可能有很大的差别。

在 30 多 a(年)的时间里,一些规定的内容发生了变化,主要变化如下:

2.2.1 提高了小厚度工件允许的最高透照电压

对 < 400kV 的 X 射线, 有关允许使用的最高透照电压的规定在 30a 中发生了较大变化。最初, 没有比较明确的规定, 普遍认为应采用较低的透照电压, 如英国 BS 4080—1966 标准规定, 如果曝光量 < 4mA · m in, 则说明透照电压过高, ISO 标准的提法是, 透照电压应尽可能低, 在焦距为 760mm, 曝光时间 1m in, 所选用的透照电压应使曝光量 A 级 8mA · m in, B 级 15mA · m in 时得到适宜的黑度值。约从 70 年代起, DN, BS 和 ISO 等标准相继规定了具体的最高透照电压。BS 标准对不同的胶片, 即不同的射线照相技术级别, 规定了不同的最高透照电压值, 而其它标准则未分别作规定。我国标准从 80 年代起采纳了 DN 或 ISO 标准的有关条款, 作了这方面的规定。日本工业标准 (JIS) 至今仍未直接对这方面作出规定。

由于不同类型胶片的感光速度存在明显差别, 所以, 适宜于一种类型胶片的透照电压不一定适宜于另一种类型胶片, 如对 D7 胶片适宜的透照电压对 D4 胶片将显得较低, 或者说, 后者需要过长的曝光时间。因此, 对不同射线照相技术级别规定统一的最高透照电压是存在问题的。英国标准对不同级别技术规定不同最高透照电压, 具有实际意义。

DN 54111—1—1988 标准除了为钢, 还为钛和铝给出了最高透照电压, 并提高了旧版本标准对厚度 < 10mm 钢规定的最高透照电压值, 这个改变反映了实践经验。ISO 标准第 1 版和我国标准对透照厚度 < 10mm 时最高透照电压的规定值, 与实际可允许的值存在一定的距离。一般说, 各标准对 < 400kV 的 X 射线规定的最高透照电压值, 都高于实际采用值, 特别对采用 GIII 类胶片的 A 级技术。

### 2.2.2 改变了焦距最小值的规定方式

在射线照相标准中, 关于射线照相技术透照参数之一的焦距, 如归结为对几何不清晰度的考虑, 多数标准的规定大体上都经历了三个阶段, 即按技术级别规定允许的最大几何不清晰度值。对技术级别, 按透照厚度分段规定允许的最大几何不清晰度值。对技术级别, 按透照厚度 (连续) 规定允许的最大几何不清晰度值。第一种规定方式对较小的透照厚度, 规定的最大几何不清晰度值偏大; 对较大的透照厚度, 规定的最大几何不清晰度值偏小, 在技术上存在明显的不合理性。第二种规定方式希望克服第一种规定方式存在的不足, 却引入了一种阶跃式的变化。这些阶跃值点存在的合理性很难得到合理解释。第三种规定方式消除了前两种规定方式存在的不足, 间接地将射线照相时的能量与焦距 (几何

条件) 联系起来, 使透照参数在一定程度上构成内在的和谐性。但目前广泛采用的系数值 (对 A 级 7.5 和对 B 级 15), 对钢铁材料可能适宜, 对其它材料, 特别是轻金属材料, 可能并不适宜, 因为在同样透照厚度的情况下, 轻金属材料所需的透照电压 (射线能量) 将远低于钢铁材料。

约从 70 年代起, 英国射线照相标准明确提出, 应从确立胶片固有不清晰度与几何不清晰度的关系规定焦距值。近年来有文献强调了这种观点, 结论是不同级别的射线照相技术, 应按下列关系考虑焦距最小值 (胶片固有不清晰度  $U_i$ )

一般灵敏度技术:  $U_g = 2U_i$

较高灵敏度技术:  $U_g = U_i$

很高灵敏度技术:  $U_g = 0.5U_i$

或者说

A 级技术:  $U_g = (1 \sim 2)U_i$

B 级技术:  $U_g = (0.5 \sim 1)U_i$

这种关系直接将透照参数的射线能量和焦距联系起来, 构成透照参数自身的和谐性, 它克服了第三种规定方式不适用于各种材料的不足。应用中可能产生的问题是, 对轻金属材料, 当透照厚度较小时可能要求较大的焦距值, 这是应进一步考虑的问题。

约从 80 年代起, 日本工业标准采用了以规定系数  $m$  的方式规定焦距最小值, 即

$$m = \frac{L_1}{L_2}$$

近年来, 这个系数的具体规定方式, 随着象质计灵敏度规定方式的改变而发生了变化。最初, 按透照厚度分段规定相应的系数值, 稍后, 改用按焦点和应识别丝径关系的形式规定这个系数。

### 2.2.3 曝光量

如前所述, 曝光量是射线照相技术级别中难以严格规定的透照参数, 特别是对 < 400kV 的 X 射线。60 年代曾提出的曝光量值有

BS 4080—1966:  $E = 4\text{mA} \cdot \text{m in}$

ISO 标准: A 级  $E = 8\text{mA} \cdot \text{m in}$

B 级  $E = 15\text{mA} \cdot \text{m in}$

70 年代, 英国标准推荐了下列曝光量值

方法 1 (很高灵敏度技术):  $E = 30\text{mA} \cdot \text{m in}$

方法 2 (较高灵敏度技术):  $E = 20\text{mA} \cdot \text{m in}$

方法 3 (一般灵敏度技术):  $E = 15\text{mA} \cdot \text{m in}$

我国标准多推荐或规定曝光量  $15\text{mA} \cdot \text{m in}$ 。

### 2.2.4 提高了底片允许黑度的下限值

限定射线照片的黑度范围, 是射线照相技术级别规定中的一项重要规定。60 年代以来, 一直射

线照相技术级别分别规定黑度范围。近年来,一些原来黑度值规定较低的标准,都在提高原规定黑度值,特别是允许的黑度下限值。表 6-2 是我国部分射线照相标准的黑度规定值。黑度值的提高是为了有效控制射线照片对比度和影象颗粒度。

表 6-2 我国部分射线照相标准的黑度规定值

技术级别	JB 928—67	GB 3323—82	GB 3323—87
A (乙)	0.7~1.5	1.2~3.0	1.2~3.5
B (甲)	1.0~2.0	1.2~3.0	1.5~3.5

### 2.2.5 技术级别规定变化概述

射线照相标准关于射线照相技术级别的规定,在 30 多年的时间里作了多方面的修改,概括起来可认为:

(1) 工业射线胶片初步分为四类, A 级技术最低应选用 G III 类胶片, B 级技术最低应选用 G II 类胶片。对射线胶片的分类,还在进行研究。最初允许使用的荧光增感屏, 约从 80 年代起, 已被大多数标准严格禁止使用, 现在普遍规定使用金属箔增感屏。

(2) 关于透照参数, 射线照相标准主要是围绕低能 X 射线, 即 40~400kV X 射线规定技术内容。对钢铁、钛和铝等材料已提出了允许的最高透照电压, 但还缺少不同射线照相技术级别普遍公认的限定值规定。将能量条件与几何条件联系起来考虑, 对钢铁材料提出了实用的最小焦距规定, 对其它材料尚需进行较深入的研究。对曝光量已提出了一些推荐值, 但它仍然是一个难以严格规定的参数。对 < 40kV 的低能射线照相技术, 目前尚无严格规范。

(3) 射线照片质量的两个重要方面, 即黑度和象质计灵敏度, 已趋向统一。允许的黑度范围下限值基本上是 A 级: 1.7~2.0; B 级: 2.0~2.3。象质计灵敏度广泛采用丝型象质计测定, 而且以按透照厚度分段规定应识别丝径的方式规定灵敏度。丝型象质计主要反映的是射线照相的对比度。已从理论和试验上研究了它与其它细节(如柱孔、球孔和矩形缝等)的可识别性关系, 即不同象质计灵敏度的关系。

可以说, 关于射线照相技术级别的规定已取得了成功的结果, 但仍有一些问题需进一步研究。

## 3 射线照相方法标准的选用

如上所述, 限定了所采用的射线照相检验技术, 就限定了能够得到的射线照片的质量, 也就限定了射线照相检验的结果。因此, 为了满足验收技术条件的要求, 必须正确选取射线照相方法标准。在工件的

技术条件中一般都会明确规定应采用的射线照相方法标准和射线照相检验技术级别, 但也会出现未明确规定的情况, 这时应分析工件技术条件中关于内部质量的规定, 并以其必须检出的最小缺陷为依据, 仔细考虑影响工件质量的关键, 确定应采用的射线照相方法标准和射线照相检验技术级别, 保证须检出的最小缺陷能够有效检出。

## 4 射线照相检验质量控制

### 4.1 概念

质量在不同领域和不同部门具有不同的含义。在一般情况下其抽象为“反映实体满足明确和隐含需要的能力的特性的总和”。这里所说的“实体”被定义为“可单独描述和研究的事物”, 它可以是活动或过程、产品、组织、体系或人, 以及它们的组合。

射线照相检验是射线照相检验人员利用一定的设施、设备、器材和检验技术得出射线照相检验结论的过程。射线照相检验质量具体体现在射线照片(底片)质量和评定结论的可信性两个方面。没有稳定的过程就没有稳定的质量, 为保证射线照相检验结论的正确性和可靠性, 必须对射线照相检验进行质量控制。

按质量管理和质量保证系列国家标准, 质量管理、质量保证和质量控制不是同一概念。质量管理定义为“确定质量方针、目标和职责, 并在质量体系中通过诸如质量策划、质量控制、质量保证和质量改进使其实施的全部管理职能的所有活动”; 质量保证定义为“为了提供足够高的表明实体能够满足质量要求的可信度, 而在质量体系中实施并根据需要进行证实的全部有计划和有系统的活动”; 质量控制定义为“为达到质量要求所采取的作业技术和活动”。图 6-2 是质量体系的构成框图, 它清楚地显示了质量管理、质量保证和质量控制与质量体系的关系, 从中可以看到, 质量管理的职能是负责确定并实施质量方针、目标和职责, 它包括了质量控制。质量控制中的“作业技术和活动”的目的是监视产品形成的全过程并排除可能出现的质量问题。

射线照相检验质量控制, 就是从人员、检验技术、设备器材和环境条件等方面进行控制, 以保证射线照相检验质量。

### 4.2 射线照相检验人员控制

为保证射线照相检验过程处于稳定的受控状态, 从事射线照相检验的人员必须按无损检测人员资格鉴定与认证标准的规定进行培训和考核, 取得技术资格证书后才能从事与技术资格相应的工作。

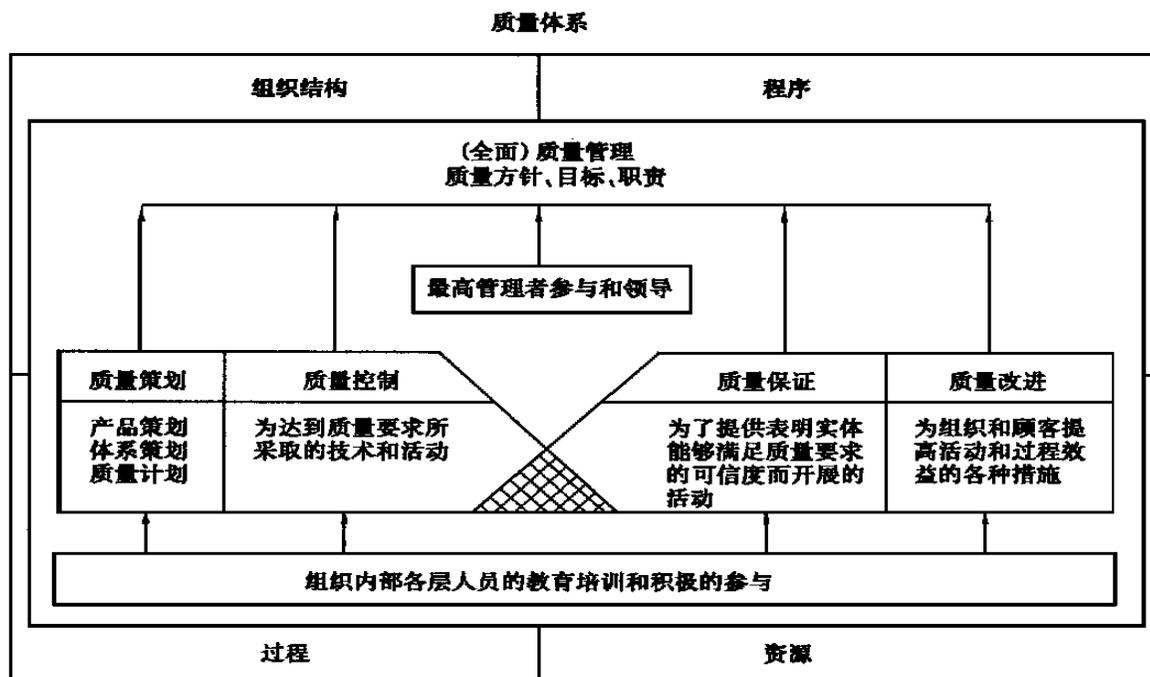


图 6-2 质量体系的构成

为取得技术资格, 有关人员必须具备一定的实践经验, 并接受有关基础知识、专业知识、相关知识和操作技能的培训, 然后通过考核及答辩。

### 4.3 射线照相检验技术控制

射线照相检验技术控制一般应包括下列方面。

#### 4.3.1 编制射线照相检验操作通用规程

为了使射线照相检验技术处于稳定的控制状态, 从事射线照相检验工作的单位应依据工业系统的有关标准编制射线照相检验操作通用规程, 该规程对射线照相检验技术的共同环节作出通用性规定, 它至少应包括 射线照相检验的基本流程与人员职责。曝光曲线的制作、使用与修正规定。射线照相检验工艺(技术)卡编制的规定。透照过程操作的要求。暗室处理操作的要求。评片操作的要求。检验记录与报告签发的规定。技术资料存档的规定。这些内容当然可分别编成一些独立的规程。

#### 4.3.2 射线照相检验工艺(技术)卡

射线照相检验工艺(技术)卡是对具体工件进行射线照相检验的技术依据, 通过工艺卡文件可实现对射线照相检验具体技术状态的控制。因此, 在对具体工件进行射线照相检验之前, 应按射线照相检验操作通用规程的规定和工件技术条件规定的 X 射线照相检验标准的要求, 编制射线照相检验工艺(技术)卡。射线照相检验工艺(技术)卡至少应包括以下四方面的内容:

- (1) 工件 名称、材料牌号、透照部位和厚度。
- (2) X 射线照相检验技术 标准、技术级别、透照布置、透照参数、设备与器材。
- (3) 质量要求 底片黑度、底片灵敏度和质量验收标准。
- (4) 签署 编制和审核。

#### 4.3.3 工艺稳定性控制

工艺稳定性控制主要包括曝光曲线的定期修正、射线机性能的定期测定和溶液有效性试验。这些可能包括在通用操作规程中, 它们监控着射线检验工艺中一些变化的因素。

#### 4.3.4 新技术、新方法和新配方使用的控制

射线照相检验中采用新技术、新方法和新配方时, 需经充分试验验证, 并经主管部门批准后方可投入使用。较重大的技术改变, 应经必要的试用期和专家评审, 才能正式采用。

### 4.4 设备与器材的控制

控制射线照相检验所用设备和器材质量, 是保证射线照相检验质量非常重要的环节。设备器材质量控制须包括六个方面: 所用设备器材应满足采用的射线照相检验标准要求。所用主要设备和器材, 如射线机、胶片、观片灯、黑(密)度计、自动洗片机和象质计等, 在入厂时应有合格证或有关的合格证明材料。射线机和自动洗片机应建立使用登记制度。X 射线机的辐射强度、辐射角和有效焦点尺寸等主要性能应定期测定。胶片应建立入厂抽

验、使用和保管制度。黑(密)度计应建立定期校验制度。

这样可使射线照相检验中所使用的设备和器材处于有效、受控状态。

#### 4.5 射线照相检验试验室的控制

射线照相检验必须在一定的设施条件和环境下进行,才可能得到符合质量要求的结论。从事射线照相检验基本单位的射线照相检验试验室必须满足一定的条件,才可能进行达到质量要求的射线照相检验工作。射线照相检验试验室的最低控制要求为:

至少应有独立的射线机房、控制室和暗室,一般应有独立的评片室。射线机房的防护设计应符合 GB 8703 或 GB 4792 标准的有关规定,应有适于工作的面积和通风及冷却设备,还应根据工作需要安装必要的吊装设备。暗室温度和湿度应可控制在适当范围,应安装通风设备和安全红灯。采用手工处理时显影处理部分应安装定时及温控装置。评片室的光线、照度和环境噪声应满足评片要求,温度应可控制在适当范围。进行现场射线照相检验时,应有辐射测量计,以便确定辐照安全区。具有所执行射线照相检验标准规定的设备和器材,至少应有 X 射线机、胶片、观片灯、黑(密)度计、象质计、暗室的必要设备、铅标记及必要的工装设备。具有射线照相检验技术 II 级或 III 级资格的人员总数应不少于两名。编制出射线照相检验操作规程、检验记录与报告等,备有执行的射线照相检验标准和有关技术条件等。

收稿日期: 2000-01-28

(上接第 277 页)

评定区,每张底片在各自有效评定区内以对应的焊缝厚度进行评定。当评定第 II 和第 III 次透照的底片时,要与前次底片组对照,以分清缺陷所在的焊层。特别要区分出耐蚀层焊接缺陷,必须保证其它焊层的缺陷不得误判为耐蚀层缺陷,否则将造成不可挽回的质量事故和重大经济损失。

整个焊道焊满后共分四层透照,每一检验部位的一套底片至少有七张,若有超标缺陷,返修复探可达十几张底片。

#### 4 结束语

(1) 同型多胶片多增感方法利用不同厚度铅增感屏与多张胶片的组合与排列,可提高一次透照的厚度宽容度,保证了大厚度差双槽型焊缝的透照质量,从而满足了尿素合成塔环焊缝分层进行射线探伤和分层控制焊接质量的特殊要求。

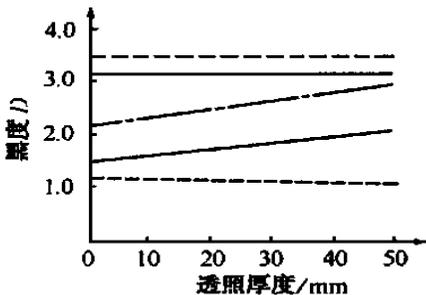
(2) 同型多胶片多增感射线检测技术,在多层包扎厚壁压力容器的焊接质量控制及大厚度差工件的射线检测中具有重要的应用价值。

#### 参 考 文 献

- 1 美国无损检测学会编,《美国无损检测手册》译审委员会译 美国无损检测手册·射线卷 上海:世界图书出版公司,1992
- 2 日本无损检测协会编,李衍译 射线探伤 B. 北京:机械工业出版社,1988
- 3 刘德镇主编 现代射线检测技术 北京:中国标准出版社,1999

收稿日期: 2000-01-10

(上接第 264 页)



附图 钛合金焊缝 X 射线照相黑度选择范围

- - - 标准规定的黑度范围 ——— 试验确定的黑度范围  
————— 最佳黑度值

足象质指数要求,即不一定能辨别出焊缝中的缺陷。

只有当 X 射线底片黑度缩小在一个比标准规定更窄的范围内时,才能解决这一问题。本文通过试验推出的附图,直观地表明了不同厚度的钛合金焊缝射线照相时可选择黑度范围以及最佳黑度,即黑度  $D$  应控制在附图中实线所包容的范围内,其黑度愈接近最佳黑度值愈好。这对各种厚度的钛合金焊缝探伤提供了很有实用价值的指南。

#### 参 考 文 献

- 1 日本无损检测协会编,李衍译 射线探伤 B. 北京:机械工业出版社,1988 27, 28, 72, 73, 84

收稿日期: 1999-08-23