

# 管道环焊缝数字射线成像检测最少透照次数的确定

刘长山

(四川迪派锐科技有限公司,绵阳 621000)

**摘要:**国内现行数字射线成像检测标准对于管道环焊缝的最少透照次数都没有简单、有效确定方法,而直接参照行射线胶片检测的最少透照次数来确定有很大的局限性。依据标准 SY/T 4109.5—2013,分别针对双壁单影透照法与中心内透照法,分析了影响最少透照次数的因素,并提出了确定最少透照次数的计算公式,以便于检测人员参考。

**关键词:**数字射线成像检测;管道环焊缝;最少透照次数

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2021)03-0032-03

## Determination of the minimum times of digital radiography needed for pipeline girth weld

LIU Changshan

(Sichuan DPRI Technology Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

**Abstract:** There is no simple and effective method to determine the minimum times of digital radiography needed for pipeline girth weld. And the minimum times deduced by referencing to RT has great limitations directly. Based on SY/T 4109.5—2013, this paper analyzes the factors affecting the minimum times for DWSI and SWSI respectively, and proposes a calculation formula for NDT personnel.

**Key words:** digital radiography testing; pipeline girth weld; minimum times of exposure

国内现行的数字射线成像检测常用标准主要有 GB/T 3323.2—2019, NB/T 47013.11—2015, SY/T 4109.5—2013 等,选择管道环焊缝数字射线成像的最少透照次数时几乎都是参照行射线胶片检测标准,但是直接引用会存在很大的局限性,主要是因为平板探测器呈刚性,无法像胶片一样紧贴焊缝,且出于对平板探测器安全的考虑,其需要与焊缝表面保持一定距离,这样存在的几何放大效应远远大于胶片检测的,因此必须要考虑进行搭接,以避免漏检的情况发生,此外平板探测器有效成像长度很有限,常用的大面积平板探测器有效成像长度约为 300 mm,这就进一步影响了透照次数。管道环焊缝射线检测的主要透照方式为双壁单影透照和中心内透照两

种,从理论或标准角度考虑,两种方式最少透照次数所涉及的控制指标主要有几何不清晰度、横向裂纹检出角、几何放大倍数比、平板探测器的有效成像长度以及 X 射线机辐射场范围等,笔者依据标准 SY/T 4109.5—2013 分别对两种透照方式影响透照次数的控制指标进行逐条分析。

### 1 双壁单影透照方式最少透照次数的计算

利用数字射线成像技术对环焊缝进行双壁单影透照的透照布置如图 1 所示。

图 1 中: $L'_1$  为射线焦点到有效部位端点源侧表面连线的垂直距离; $L'_2$  为有效部位端点源侧内表面到探测器接收面的垂直距离; $\phi_o$  为管道外径; $\phi_i$  为管道内径; $d$  为射线机有效焦点尺寸; $T$  为管道公称厚度; $H$  为射线焦点到源侧管道外壁的最小距离; $h$  为探测器侧管道外壁到探测器的最小距离; $\alpha'$  为最大一次长度对应的半圆心角; $\alpha'$  为有效评定长

收稿日期:2020-08-03

作者简介:刘长山(1991—),男,助理工程师,主要从事长输油气管道环焊缝数字射线成像检测工作

通信作者:刘长山, changshanliu@126.com

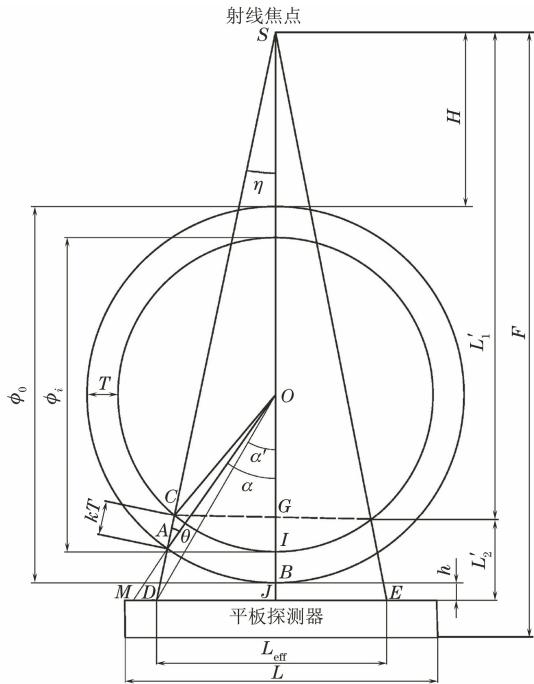


图 1 双壁单影透照布置示意

度对应的半圆心角;  $k$  为透照厚度比;  $L$  为探测器有效成像长度;  $L_{\text{eff}}$  为数字图像上的有效评定长度;  $F$  为射线焦点到平板探测器的距离。

### 1.1 满足几何不清晰度的最少透照次数 $N_1$

图 1 中, 线段  $AC \approx GI$ , 则

$$L'_2 \approx \frac{\phi_0}{2} - \frac{\phi_0}{2} \cdot \cos \alpha + h + k \cdot T \quad (1)$$

$$L'_1 = F - L'_2 \quad (2)$$

根据标准 SY/T 4109.5—2013 要求有

$$L'_1 \geq 10d \cdot L'_2 \cdot T^{-1/3} \quad (3)$$

则解出满足几何不清晰度的最少透照次数

$$N_1 = \pi / \alpha \quad (4)$$

### 1.2 满足 $K$ 值(控制横向裂纹检出角)的最少透照次数 $N_2$

可以采用公式计算<sup>[1]</sup>或直接查标准附录的最少透照次数图来确定最少透照次数  $N_2$ 。因为计算公式和标准附录的最少透照次数图均以胶片射线照相检测为基础, 计算焦距  $F$  时未考虑  $h$ , 所以计算数字射线成像检测的最少透照次数时, 需要将  $F-h$  作为公式中或查图纵坐标中的  $F$  值, 代入计算公式求出  $N_2$ 。

### 1.3 满足几何放大倍数比的最少透照次数 $N_3$

标准 SY/T 4109.5—2013, GB/T 3323.2—2019 均规定了最大几何放大倍数  $M_{\max}$  与最小几何放大倍数  $M_{\min}$  之比应不大于 1.25, 即

$$M_{\max} = F / L'_1 \quad (5)$$

$$M_{\min} = F / (\phi_0 + H) \quad (6)$$

$$M_{\max} / M_{\min} \leq 1.25 \quad (7)$$

因此

$$N_3 = \pi / \alpha \quad (8)$$

### 1.4 满足探测器有效成像长度的最少透照次数 $N'_4$

SY/T 4109.5—2013 及 NB/T 47013.11—2015 标准均规定分段透照时, 两边相邻搭接长度  $\Delta L$  不小于 10 mm, 根据几何关系

$$\tan \alpha' = \frac{(L - 2 \cdot \Delta L) / 2}{\phi_0 / 2 + h} \quad (9)$$

$$N'_4 = \pi / \alpha' \quad (10)$$

$$\tan \alpha = \frac{(L - 2 \cdot \Delta L) / 2 + l}{\phi_0 / 2 + h} \quad (11)$$

$$N_4 = \pi / \alpha \quad (12)$$

式中:  $l$  为图 1 中  $D$  点到  $M$  点的距离;  $N_4$  为最大长度对应的最少透照次数。

由式(9)~(12)可知,  $\alpha' < \alpha$ ,  $N'_4 > N_4$ , 因此采用  $\alpha'$  代替  $\alpha$  计算最少透照次数, 能确保更长的搭接长度并简化计算过程, 其实无论使用  $\alpha'$  或  $\alpha$  计算得到的透照次数  $N'_4$  和  $N_4$  向上取整后几乎一致, 即满足探测器有效成像长度的最少透照次数可由式(9)~(10)确定。

### 1.5 辐射场范围对最少透照次数的影响

双壁单影透照一般使用定向 X 射线机, 按靶面角度(定向 X 射线机固有的半辐射角)为 20°计算, 则有效辐照场长度为  $2F \tan 20^\circ \approx 0.73F$ , 对于常规透照, 其远大于有效评定长度  $L_{\text{eff}}$ , 因此除小径管平移法双壁双影椭圆成像外, 可以不考虑辐射场的影响。

### 1.6 小结

综上,  $N_1, N_2, N_3, N'_4$  向上取最小整数值, 然后选择 4 个数值中最大值作为双壁单影透照最终的最少透照次数  $N$ , 并可得半圆心角  $\alpha = \pi / N$ ; 一次透照长度  $L_3 = \pi \phi_0 / N$ 。由于探测器与探测器侧管道外壁存在一定距离( $h$ ), 且探测器为刚性平面, 因此探测器采集的数字图像上有效评定长度  $L_{\text{eff}}$  要大于  $L_3$ , 可根据几何关系求出  $L_{\text{eff}}$ , 即

$$L_{\text{eff}} = F \phi_0 \sin \alpha / L'_1 \quad (13)$$

现以双壁单影透照  $\phi 813 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ (外径  $\times$  公称厚度)管道环焊缝为例计算平板探测器满足 SY/T 4109.5—2013 标准的最少透照次数  $N$  及有效评定长度  $L_{\text{eff}}$ 。对于典型的管道环焊缝双壁单影透照数字射线自动检测系统,  $d$  为 3 mm,  $H$  为 250 mm,  $h$  为 25 mm,  $L$  为 305 mm,  $k$  为 1.1。

根据 1.1~1.4 节分别求得  $N_1=7, N_2=5, N_3=$

$4, N'_4 = 10$ , 因此最少透照次数为 10 次, 对应的  $\alpha = 18^\circ$ , 有效评定长度  $L_{\text{eff}} = 268.27 \text{ mm}$ , 每边的搭接长度  $\Delta L = 18.37 \text{ mm}$ 。使用 SOLIDWORKS 软件进行构图验算, 当  $N = 10$  时,  $\alpha = 17.99^\circ$ ,  $k = 1.02$ ,  $L'_1 = 1020.84 \text{ mm}$ ,  $L'_2 = 67.16 \text{ mm}$ , 有效评定长度  $L_{\text{eff}} = 261.91 \text{ mm}$ , 每边的搭接长度  $\Delta L = 21.54 \text{ mm}$ , 可见误差并不大, 且文章中计算的  $\Delta L$  比真实  $\Delta L$  小, 更加有利于缺陷的检出。

由  $N_1, N_2, N_3, N'_4$  可知, 按不同条件演算出的最少透照次数差距很大, 原因在于管径曲率的影响和探测器有效成像长度的限制。对于直径较大管道 ( $\phi_o \geq 508 \text{ mm}$ ; 常用厚度), 实际应用可以直接计算  $N_2, N'_4$ , 然后取最大值作为最少透照次数, 一般可以满足标准要求。

## 2 中心内透照方式最少透照次数的计算

利用平板探测器对环焊缝进行中心内透照的透照布置如图 2 所示。

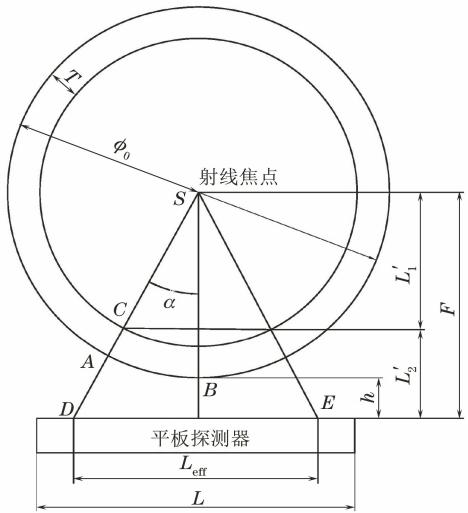


图 2 中心内透照布置示意

### 2.1 满足几何不清晰度的最少透照次数 $N_5$

图 2 中,  $CD \approx L'_2$ , 则

$$L'_2 \approx \frac{\phi_o/2 + h}{\cos \alpha} - \frac{\phi_i}{2} \quad (14)$$

$$L'_1 = F - L'_2 \quad (15)$$

根据标准 SY/T 4109.5—2013 有

$$L'_1 \geq 10d \cdot L'_2 \cdot T^{-1/3} \quad (16)$$

则满足几何不清晰度的最少透照次数

$$N_5 = \pi/\alpha \quad (17)$$

$CD$  为图中 C 点到 D 点的距离。

### 2.2 满足几何不清晰度的最少透照次数 $N_6$

计算原理与上节相同, 则有

$$M_{\max} = F/L'_1 \quad (18)$$

$$M_{\min} = \frac{F}{\phi_o/2} \quad (19)$$

$$M_{\max}/M_{\min} \leq 1.25 \quad (20)$$

$$N_6 = \pi/\alpha \quad (21)$$

### 2.3 满足探测器有效成像长度的最少透照次数 $N_7$

计算原理与上节相同, 则有

$$\tan \alpha = \frac{(L - 2 \cdot \Delta L)/2}{\phi_o/2 + h} \quad (22)$$

$$N_7 = \pi/\alpha \quad (23)$$

### 2.4 小结

综上,  $N_5, N_6, N_7$  向上取最小整数值, 然后选择 3 个数值中的最大值作为中心内透照最终的最少透照次数  $N$ , 并可得半圆心角  $\alpha = \pi/N$  及一次透照长度  $L_3 = \pi \cdot \phi_o/N$ 。然后根据几何关系求出  $L_{\text{eff}}$ , 即

$$L_{\text{eff}} = F \cdot \phi_i \cdot \sin \alpha / L'_1 \quad (24)$$

现以中心内透照  $\phi 1422 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ (外径  $\times$  壁厚)管道环焊缝为例计算平板探测器满足 SY/T 4109.5—2013 标准的最少透照次数及有效评定长度。对于典型的管道环焊缝中心内透照数字射线自动检测系统,  $d$  为 3 mm,  $h$  为 25 mm,  $L$  为 305 mm。

根据 2.1~2.3 节分别求得  $N_5 = 16, N_6 = 6, N_7 = 17$ , 因此最少透照次数取 17, 对应的  $\alpha = 10.59^\circ$ , 有效评定长度  $L_{\text{eff}} = 275.60 \text{ mm}$ , 每边的搭接长度  $\Delta L = 14.70 \text{ mm}$ 。同样使用 SOLIDWORKS 软件进行构图验算, 当  $N = 17$  时,  $\alpha = 10.58^\circ, L'_1 = 674.33 \text{ mm}, L'_2 = 61.67 \text{ mm}$ , 有效评定长度  $L_{\text{eff}} = 275.02 \text{ mm}$ , 每边的搭接长度  $\Delta L = 14.99 \text{ mm}$ , 可见误差并不大。

## 3 结语

标准 SY/T 4109—2013 附录 G 中确定最少透照次数的公式综合考虑了几何不清晰度和探测器固有不清晰度, 但是由于涉及隐函数较多, 求解很复杂, 此外图像不清晰度(分辨率)可以使用补偿原则进行补偿, 也可以使用双线型像质计直接测定, 因此并未考虑此方法。笔者所用方法借助 EXCEL 软件或者数学软件构建关系, 可以方便、快捷地确定管道环焊缝的最少透照次数, 比直接参照射线胶片照相检测相关标准来确定最少透照次数更加严谨, 可为从事环焊缝数字射线成像检测的人员提供参考。

### 参考文献:

- [1] 强天鹏. 射线检测 [M]. 北京: 中国劳动保障出版社, 2007.