

# 超小直径管 X 射线照相检测与评判

蔡闰生 金 虎 任华友 袁生平

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 区别于小直径管焊缝射线检测通常采用椭圆成像的方法,超小直径管焊缝检测经常会用到垂直透照法。本文结合超小直径管的具体情况,通过透照厚度比和成像位移分析,对椭圆成像和垂直透照两种透照技术的选用进行了论述。并针对垂直双壁单影透照法射线影像重叠的特点,对超小直径管反面余高(焊漏)的影像特征进行了重点分析,提出了反面余高尺寸测定的两种可行方法。此外通过对垂直透照法有效透照次数的计算验证,得出了简化透照法能够满足实际工程需要的结论。

**关键词** 小直径管,X 射线,照相技术,反面余高

## X-ray Radiography and Judgments on Super Small Diameter Tube

Cai Runsheng Jin Hu Ren Huayou Yuan Shengping

(( Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Different from the method of Oval imaging method on ray detection of narrow-bore tube weld, the Ultra narrow-bore tube weld detection normally use the vertical transillumination method. The essay discusses the choice of oval imaging and the vertical transillumination method through the transillumination thickness ratio and the imaging displacement analysis, base on the specific circumstances of the Ultra narrow-bore tube. According to the feature of ray image overlay of vertical double-wall single shadow transillumination, the essay do key analysis on the image feature of the Ultra narrow-bore tube opposite reinforcement, propose two practical way of measuring the figure of opposite reinforcement. The essay concludes that the simplified transillumination satisfy the actual needs of the project.

**Key words** Narrow-bore tube, X-ray, Photographic techniques, Opposite reinforcement

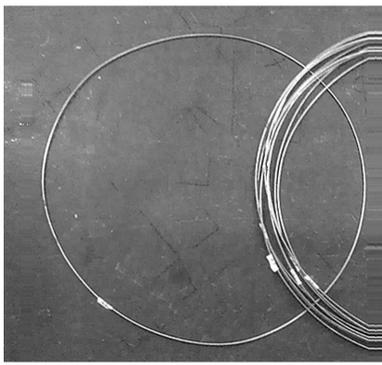
### 0 引言

外径 $\leq 89$  mm 的管子,一般称为小直径管,其中外径在 3 mm 以下可盘卷的小直径管,被定义为超小直径管。小直径管对接环焊缝的 X 射线照相检测,通常采用椭圆成像法或垂直透照法两种射线照相技术,两种透照技术涵盖了椭圆双壁双影和垂直透照双壁单影两种成像方法<sup>[1]</sup>。其中椭圆成像优势在于:检测工作效率高,缺陷定位方便,对气孔、夹渣等体积型缺陷有很好的检出率,其劣势在于:对未焊透,裂纹等缺陷检出率不高。相对于椭圆成像法,垂直透照法虽具有良好的缺陷检出率,但检测效率偏低,缺陷定位复杂,往往应用于有遮挡物、椭圆成像透照布置困难的工件。

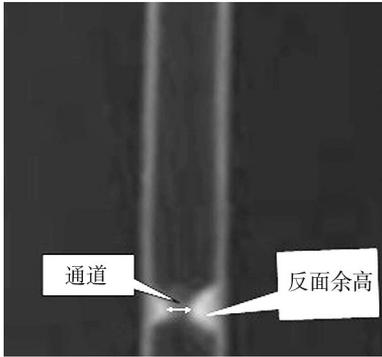
本文结合外径 2.6 mm,壁厚 0.5 mm 的超小直径管,对透照技术、方法的选取,反面余高尺寸的测定进行了较为详尽的论述,另外对垂直透照法的有效照相次数进行了计算。

### 1 背景介绍

不锈钢小管,外径 2.6 mm,壁厚 0.5 mm,由氩弧焊完成对接,形成 O 形环,外表面打磨并喷涂,见图 1(a)。因小管内部有预装成份,工作压力约 4 MPa,为保证焊接质量和管道通畅,客户要求:(1)射线检查环焊缝内部质量;(2)检查焊缝反面余高(焊漏)尺寸,要求内部通道尺寸不小于 0.6 mm 图 1(b)。



(a) 外形结构



(b) 射线影像

图1 环形小管外形结构图及射线影像

Fig.1 Circular tubular shape structure and X-ray imaging

## 2 透照方法分析及选取

椭圆双壁双影成像法的典型透照布置见图2。

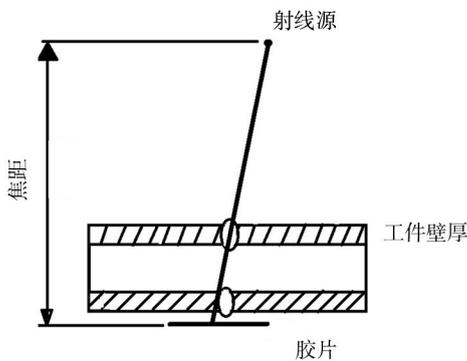


图2 椭圆成像法典型透照布置

Fig.2 Oval radiographic imaging method of typical layout

椭圆双壁双影成像法的具体规定为:当管外径  $D \leq 89$  mm,壁厚  $T \leq 8$  mm,焊缝宽度  $b \leq D/4$  时,采用倾斜透照方式椭圆成像。不满足上述条件,或椭圆成像有困难,或为适应特殊需要(如特意要检出焊缝根部的面状缺陷)时,可采用垂直透照方式重叠成像<sup>[2]</sup>,典型透照布置见图3。

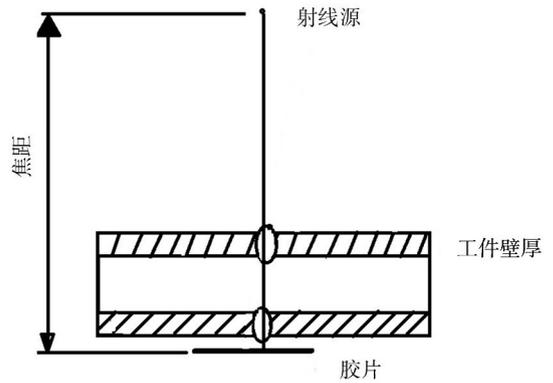


图3 垂直双壁单影典型透照布置

Fig.3 Double-wall vertical radiograph typical layout only

### 2.1 椭圆成像法应用分析

椭圆成像法的应用主要考虑两方面的问题:

(1)透照厚度比,即在射线中心束垂直小管轴线的情况下,其离开小管断面圆心不同距离处的透照厚度与圆心处厚度的比值;

(2)透照时被检工件相对射线源中心束的位移距离<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.1 椭圆成像透照厚度比分析

小径管对接焊缝的透照是一个变截面透视。在小径管对接接头照相检验中,所选用的焦距都远大于小直径管的外径,可近似认为射线平行入射,所以,确定椭圆透照方法的核心,就是选取符合规定的透照厚度比,透照厚度比可按式进行选择计算。

当  $x < r$  时:

$$k = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} - \sqrt{(1 - 2T/D)^2 - (x/R)^2}}{2(T/D)}$$

当  $x \geq r$  时:

$$k = \frac{\sqrt{1 - (x/R)^2}}{2(T/D)} \quad (1)$$

式中, $k$ 为透照厚度比, $R$ 为管外径, $r$ 为管内径, $T$ 为管壁厚, $x$ 为透照点距管轴线距。

根据公式即可在相关标准规定下,确定一次透照的厚度范围。一般标准认为当 $k$ 在1.2~1.7可以完成一次透照。

具体地:透照  $\Phi 22$  mm $\times$ 1 mm小径管,外表打磨无表面余高,透照厚度比的变化见表1。

根据表1,当 $x=r=0.8$ 和 $x>r=0.9$ 时,透照厚度比分别为2.04和1.87,超出了标准1.7规定,因此背景任务中所涉及环形小管对接焊缝无法应用椭圆成像法进行X射线透照。其主要原因是由于管壁相对管外径过大。

表 1 透照厚度比变化表

Tab. 1 Comparison of radiograph thickness change

参数	$x$	$k$
$x < r$	0	1.00
	0.3	1.05
	0.5	1.15
$x = r$	0.8	2.04
	0.9	1.87
$x > r$	1.0	1.66
	1.1	1.39
	1.2	1.00
	1.3	0

### 2.1.2 椭圆成像法位移分析

尽管在 2.1.1 中已分析过环形小管焊接件不适合椭圆成像法,但由于大多数小管照相时,不一定会首先分析  $k$  值,因此对小管成像的进一步位移分析也具有一定的实践意义。

如图 2 所示小管椭圆成像的典型布置,在实施椭圆成像时,射线源应偏离一定距离,使得小管射线源侧焊缝与胶片侧焊缝的影像都投射到底片上,在底片上形成射线源侧焊缝影像更加偏离射线源一侧,两侧焊缝在底片上形成具有一定开口宽度的椭圆形影像。

椭圆成像开口宽度控制是椭圆成像法透照布置的关键。如开口宽度过大,焊缝根部的裂缝、未焊透等缺陷有可能漏检,或者因影像畸变过大,难于判断。若椭圆开口宽度过小,又会使源侧焊缝与底片侧焊缝根部缺陷重叠,缺陷位置无从判断,另外也可能因为影像的重合而造成缺陷性质和缺陷尺寸上的误判。目前,国内各种标准中关于开口宽度的标准并不一致,有一个焊缝宽度到二个焊缝宽度的定性规定,也有 3~10 mm 的定量规定,作者认为:应该本着双缝能分开,短轴越越好的原则,以 3~5 mm 的定量最宜。确定开口宽度后,即可按照位移公式计算射线源偏移距离。

$$W = \frac{f(b+t)}{D}$$

式中,  $W$  为射线源偏离环焊缝中心面的距离;

$D$  为小管外径;

$b$  为环焊缝宽度;

$t$  为椭圆影像开口宽度;

$f$  为射线源到小管表面(射线源侧)的距离。

结合本文背景,由于外表面打磨,焊缝宽度  $b$  不详,暂定为 2 mm,  $f$  采用 500 mm, 计算位移  $W$ 。

$$W = \frac{500(2+4)}{2.6} \approx 1154 \text{ (mm)}$$

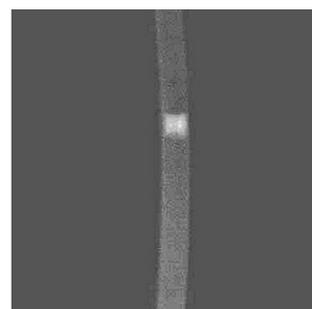
由计算结果和实际工作经验可知,1154 mm 的位移量过大,完全超出射线检测的常规范畴。排除计算错误,问题就出在环焊缝宽度数据上。但通过与客户沟通,焊缝宽度平均尺寸预估正确。由此即可断定此类环形小管不适宜椭圆成像法进行透照。这也验证了小管椭圆成像应具备的三个条件,管外径  $D \leq 89$  mm,壁厚  $T \leq 8$  mm,焊缝宽度  $b \leq D/4$ ,事实上,此类小管,若考虑反面余高,即使焊缝宽度满足  $b \leq D/4$  这一要求,也会因实际壁厚过大,而无法应用椭圆成像法进行检测。

### 2.2 垂直透照法应用分析

垂直透照法,是射线检测中一种常规的透照方法。但对于小直径管,此透照法又存在一定的特殊性,这是由于小直径管的射线检测,是一个变厚度的透视过程<sup>[4]</sup>。本文小管最大厚度差接近一倍,若考虑小管环焊缝的反面余高,厚度相差可达一倍以上。因此,不能完全移植常规照相的方法,而应采用宽容度照相技术。

宽容度照相技术,通常采用大电压、大电流、短时间的曝光参数,在某种程度上是以牺牲对比度为代价,但若增大对比度,就要增大衰减系数。增大射线波长,而增加波长的方法就需要降低管电压,由此形成了一对矛盾。要解决这个矛盾,针对具体被检产品,设计合适的透照参数和相应的技术手段就显得尤为重要<sup>[5]</sup>。

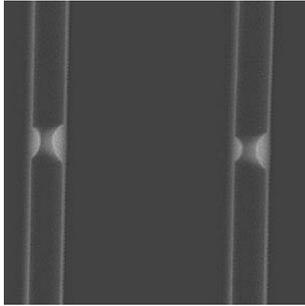
针对本文超小直径管,透照电压的选取应在透照厚度比 1.7 所示电压的基础上略提高 5%~10%,且通过试验尽量增大曝光量。其目的在于:通过对小管的 3 次垂直透照,保证每次透照的厚度差较小。此外,采用整体大厚度背铅板,以减小环境散射线的影影响;使用铅增感屏,以降低散射比,增大对比度提高影像质量;打磨小管外表面,去除表面余高,以降低工作管电压。图像对比效果见图 4。



(a) 打磨倾斜无增感



(b) 未打磨增感



(c) 打磨垂直增感

图4 影像对比效果

Fig.4 Image contrast

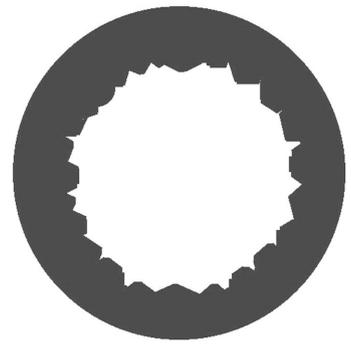
### 3 环形小管影像评判

由于采用了垂直透照,并优化了透视参数,因此焊缝的内部质量评判变得比较容易。在对多规格,多批次的环形小管评判过程中,裂纹、小气孔缺陷被陆续检出,而且由于环形小管的直径较小,发现缺陷后,无需判断缺陷在单影中的相对位置,而直接切除重新焊接,因此环形小管的垂直双壁单影法工作效率也较高。但由于用户提出了内部通道尺寸不小于0.6 mm的技术要求,因此小管焊缝的附加评判工作显得更加重要。

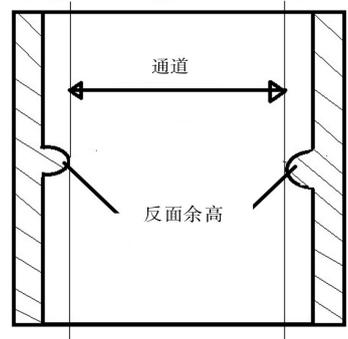
#### 3.1 反面余高影像分析与评判

由于小管对接焊时,反面余高具有随机性,因此在管子内部会形成高低错落的形态,小管轴向和径向的剖切示意图见图5。

射线照相获得的影像近似图5(b)的轴向断面影像,由于透照时焦距足够大,可近似认为X射线为平行入射,按照射线沿直线传播的原理,在图像两端凸起的上下余高,若小于现有高度,其影像必定叠加于现有余高中,而使得影像黑度减小,若大于现有余高,其影像将向通道D空间增长而形成更长的余高影像,这个更长的余高影像其实就是现有余高,由此可断定图5(b)的D就是在这个轴向断面上的最短轴,也即小管最小通道尺寸。当然这个图像不能排除形成以D为长,以几分之一D为宽的狭长近似矩形断面存在。因此旋转后再实施一次或二次的透照成为必然。



(a) 径向断面



(b) 轴向断面

图5 小管内部余高成型示意图

Fig.5 Small tube opposite reinforcement schematic diagram

#### 3.2 底片影像数字化分析与评判

对于非CR或DR的数字化图像,扫描数字化的基础仍然是影像质量好、对比度高的X射线底片。某种意义上拟待数字化的底片对影像的要求甚至更高,这是因为目前多数扫描仪对底片黑度都有一定限制,过黑或过白,都将使数字化影像的动态范围变窄。

小管环焊缝底片数字化后的优势在于,可以进行放大测量,其测量标尺随图像放大同比例放大,因此在读取类似图5(b)的D值时更精确,且重复性更好,尤其是大批量检测时,底片评判效率可大幅提高。其测量图见图6。

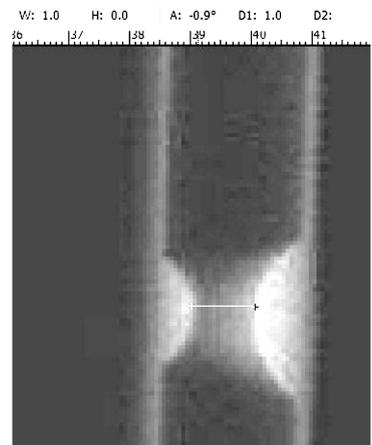


图6 小管内部通道尺寸数字化测量

Fig.6 Small tube inside the digital measurement of channel size

需要说明的是,相对于人眼百分之几的黑度分辨能力而言,数字化后的影像对比度调整范围较窄,特别是16位以下扫描仪数字化后的影像,各种参数调整空间有限,即使在边缘锐化后仍需注意测量起始点的位置。

### 3.3 垂直透照法有效照相次数计算验证

相关射线检测标准规定,若采用垂直透照法检测小直径管环焊缝,透照次数应不小于3次,即应间隔120°进行一次透照。但很多情况下,由主、客观原因,间隔90°两次完成简化透照的现象较为普遍,因此简

$$\frac{C_{4-k}^2}{C_4^2} = \frac{(4-k)(4-k-1)(4-k-2)}{2!} = \frac{(4-k)(3-k)(2-k)}{24} \quad (k=0,1,2)$$

将 $k$ 取值0、1、2分别带入上式,计算数值依次为1、0.25、0,转换为百分数则分别为100%、25%、0。其表征的意义在于:剩余2个通道尺寸都小于0.6 mm的概率是0;剩余2个通道之中1个通道大于0.6 mm的概率是75%;剩余2个通道尺寸至少有一个通道大于0.6 mm的概率是100%,因此使用简化透照法能够满足实际工程的需要。

## 4 结论

(1)对于如本文涉及的超小直径管,不能机械选用椭圆成像法进行射线透照,而应考虑焊漏尺寸等因素,在两种透照法之中甄别选取。

(2)检测有焊漏尺寸有要求的小直径管,其环焊缝外表面应事先打磨平滑。

(3)采用垂直透照法获得的边缘清晰焊漏影像,可作为该透照方向上最大焊漏尺寸的测量依据。

(4)对超小直径管射线底片进行扫描数字化后,

化透照方法的可靠性需要验证。现假定本文涉及超小直径管环焊缝采用间隔90°的简化透照法进行射线照检测,两次透照后通道 $D$ 尺寸均不小于0.6 mm。

具体地,本文小直径管环焊缝可全周长均分为4个角度检测,假定4个角度中有 $k$ 个角度的通道小于0.6 mm,则有 $4-k$ 个角度的通道大于0.6 mm。现随机检测其中2个角度,且测得的通道都大于0.6 mm,其余2个未检测角度的通道也大于0.6 mm的概率可由下式获得<sup>[6]</sup>:

还需进一步影像边缘锐化,以便于焊漏尺寸的测量。

(5)对本文涉及超小直径管,实施简化透照法,可满足实际工程需要。

### 参考文献

- [1] 强天鹏. 射线检测[M]. 昆明:云南科技出版社,2001
- [2] 郑家勋,等译. 美国无损检测手册射线卷[M]. 第一版,上海:世界图书出版公司,1992:998-1003
- [3] 郑世才. 小直径管对接焊缝射线照相技术的几个问题[J]. 无损探伤,1998(5):17-20
- [4] 张小海,王广坤. 小径管对接环焊缝有效透照厚度的计算[J]. 无损检测,2006,28(7):389-391
- [5] 周迪生. 小径管焊缝射线照相标准的实践与问题探讨[J]. 无损检测,2002,24(1):38-42
- [6] 陆元鸿,苏德中,刘剑平. 概率统计[M]. 上海:华东理工大学出版社,2003

(编辑 任涛)

---

## 《宇航材料工艺》期刊第九届编委会工作会议在京召开

按照《宇航材料工艺》期刊编委会工作制度要求,两年召开一次编委会工作会议。经过一段时间筹备,于2013年9月26日在北京召开了第九届编委会工作会议。参会编委约30人,会议由主办单位副总工程师、期刊主编刘志华主持,主办单位所长、期刊编委会主任厉克勤致辞,编辑部负责人李洪泉同志汇报期刊近两年的工作。

会上,与会编委发言踊跃。充分肯定了编辑部的工作及期刊取得的成绩,就"如何提升期刊学术水平和影响力?如何更好地为航天材料工艺技术发展服务?"展开了了座谈,讨论,提出了很多很好的意见和建议。编辑部将认真研究这些意见和建议,采取切实可行的措施,借助航天事业发展的大好时机,把刊物办得更好,为航天事业、国防事业的发展做出新的贡献。

大会达到了预期的目的,取得了圆满成功!

《宇航材料工艺》编辑部