

哈氏合金 C-276 与 16Mn 异种合金 对接焊缝射线检测

潘杰军¹, 潘敏²

(1. 江苏省溧阳市云龙设备制造有限公司, 溧阳 213311;

2. 江苏省特种设备安全监督检验研究院常州分院, 常州 213016)

摘要:分析哈氏合金 C-276 与 16Mn 两种材料对 X 射线的衰减特性, 初步得出两者射线透照等效系数的可能范围。通过试验, 获得了试验厚度范围内两种材料的射线透照等效系数。分析比较了三种大厚度比工件透照技术措施后, 确定采用厚度补偿技术, 并据此制作厚度补块用于实际检测, 解决了检测工作中工艺参数选择和底片质量控制的难题。

关键词:衰减系数; 射线透照等效系数; 大厚度比工件

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2013)08-0036-03

Radiographic Testing of Butt Weld of Hastelloy C-276 Connected with 16Mn

PAN Jie-Jun¹, PAN Min²

(1. Yunlong Chemical Equipment Co Ltd, Liyang 213311, China; 2. Changzhou branch of Special equipment safety supervision inspection institute of Jiangsu Province, Changzhou 213016, China)

Abstract: Analysis was made of the attenuation characteristics of two kinds of materials hastelloy C-276 and 16Mn to the X-ray and their radiographic equivalence coefficient range was initially concluded. Then, the radiographic equivalence coefficient in the applied thickness range of the two materials was obtained by testing. Through analyzing and comparing three RT technologies of large thickness ratio workpiece, it was determined to use thickness compensation technology, and accordingly make thickness compensation block used in the actual detection, and thus leading to solve the problem of process parameters' determination and film quality control in RT work.

Keywords: Attenuation coefficient; Radiographic equivalence coefficient; Workpiece thickness ratio

哈氏合金 C-276 是一种含钨的镍-铬-钼合金, 因其较高的强度、优异的耐腐蚀性, 而广泛应用于石油化工、造纸、环保等工业领域等苛刻的腐蚀环境中。制作压力容器零部件时, 经常采用哈氏合金与低合金钢连接的异种钢对接焊接接头形式。由于两种材质对 X 射线衰减特性差异较大, 导致射线检测时透照曝光参数选择出现问题。

1 射线衰减特性分析^[1]

X 射线在穿透物质时, 与物质产生相互作用而强度减弱, 部分射线方向发生改变。在常规工业 X

射线使用的能量范围(100~350 kV)内, 射线通过物质时强度衰减遵循指数规律。

射线的衰减情况不仅取决于辐射自身的性质, 还与吸收物质的性质和厚度有关。当射线通过单位厚度物质时, 与物质相互作用的概率用线衰减系数 μ 来表示。线衰减系数 μ 与射线能量、物质的原子序数和密度有关。

影响 X 射线衰减系数的因素较多, 为简化不同物质衰减系数的比较, 将线衰减系数 μ 除以物质密度 ρ 的结果用质量衰减系数 μ_m 来表示, 这样便于比较对于不同物质衰减系数与原子序数及射线能量的关系。

当使用相同能量的 X 射线, 穿透相同厚度的不同物质时, 穿透物质的 X 射线强度就仅取决于不同物质的原子序数。物质的质量衰减系数与物质原子

收稿日期: 2012-11-17

作者简介: 潘杰军(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事承压设备无损检测工作。

序数存在式(2)所示的关系。

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu T} \quad (1)$$

$$\mu_m = k \cdot Z^n \quad (2)$$

式中: I 为穿透物质后的射线强度; I_0 为穿透物质前的射线强度; μ 为线衰减系数; e 为自然对数的底; T 为穿透物质的厚度; μ_m 为质量衰减系数; Z 为物质原子序数; k 为常数; n 为质量衰减系数与原子序数的相关性常数,介于 2.45~2.7 之间。

某类压力容器,公称直径 DN 不小于 250 mm 的哈氏合金筒体与低合金钢锻件对接焊缝,要求进行 100% 射线检测并 II 级合格。哈氏合金材料牌号为 C-276^[2],低合金钢锻件牌号为 16Mn III^[3],焊材为 ERNiCrMo-4,焊接方法为手工氩弧焊。两种金属材料、焊接材料以及焊接后形成的焊接接头的三个部位(C-276 母材、焊缝金属、低合金母材)的化学成分不同,各化学元素的原子序数不同。焊接接头不同部位对 X 射线的衰减系数产生的影响不同。

根据所含元素的质量百分含量及相应的原子序数,由式(3)计算工件不同部位的平均原子序数。C-276 的平均原子序数为 $\bar{Z}_1 = 31.1$,16Mn III 的平均原子序数为 $\bar{Z}_2 = 25.9$,焊缝金属的平均原子序数为 $\bar{Z}_3 = 30.5$ 。计算结果说明焊缝金属与 C-276 的平均原子序数差异较小,因此对 X 射线的衰减作用差异也较小。

$$\bar{Z} = \sum_{i=1}^n Z_i \cdot \omega_i \quad (3)$$

式中: \bar{Z} 为平均原子序数; Z_i 为不同元素的原子序数; ω_i 为不同元素的百分含量, %。

(注:非金属元素对 X 射线衰减作用远小于金属元素,且含量很少,计算平均原子序数时,忽略非金属元素对平均原子序数的影响。)

再由式(2)比较工件不同部位的质量衰减系数的差异, $\frac{\mu_{m1}}{\mu_{m2}} = \frac{k \cdot \bar{Z}_1^n}{k \cdot \bar{Z}_2^n} = \left(\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_2}\right)^n = \left(\frac{31}{26}\right)^n = 1.54 \sim 1.61$ 。

由于物质对 X 射线的衰减作用,遵循射线强度指数衰减规律。射线透照检测时,要想在相同射线能量和强度的前提下获得黑度相同的底片,必须使得到达胶片的射线强度相同。

由式(1)可知,两种不同的物质和不同的厚度,必须有 $\mu_{m1} T_1 = \mu_{m2} T_2$ 。可以推导出哈氏合金对 16Mn 的射线透照等效系数 $\Psi = T_2/T_1 = \mu_{m1}/\mu_{m2} = 1.54 \sim 1.61$ 。如果考虑散射线的影响及不同厚度对散射比的影响, Ψ 值可能还要更大。

2 透照等效系数测定结果与分析

试验对象 1: C-276 板材,厚度分别为 8, 10, 14 和 18 mm。

试验对象 2: 钢板超声波检测用阶梯试块,材质为 20 号钢,阶梯厚度分别为 12, 15, 19, 24, 30, 36 和 42 mm(试验选用 15/19, 19/24, 24/30 和 30/36 mm 4 组厚度组合)。(注:选用此阶梯试块原因,① 化学成分与 16Mn 锻件的化学成分相近,平均原子序数之间误差很小,对射线的衰减特性差异小;② 阶梯厚度有试验所用哈氏合金厚度的不足 1.5 倍到 2 倍以上,可以覆盖理论分析获得的射线透照等效系数的可能范围。)

按 JB/T 4730.2-2005 标准 AB 级射线检测技术等级中关于曝光量的规定,选择焦距为 700 mm,曝光量为 15 mA·min。根据上述不同材料对 X 射线衰减特性的分析,选择与 C-276 板材两倍厚度相邻的两个台阶厚度(注:见钢板超声波检测用阶梯试块),在相应 X 射线机的曝光曲线上,选择合适的管电压进行透照曝光,如表 1 所示。

表 1 X 射线曝光曲线中透照厚度所对应管电压

透照厚度/mm		管电压/kV
C-276	20# 钢	
8	15/19	150
10	19/24	160
14	24/30	180
18	30/36	210

为避免散射射线对胶片曝光的影响,透照时需要采取防散射射线措施:① 胶片背面使用铅板防护。② C-276 板材试样尺寸大于胶片尺寸。③ 阶梯试块尺寸小于胶片,露出试块的胶片部分用铅板遮挡防护。④ 防止边蚀散射影响,阶梯试块台阶面朝上,平面与胶片接触,减少台阶处散射射线对胶片感光的影响。

所得胶片经暗室处理后,以测得的 C-276 底片黑度为基准,测量阶梯试块底片上不同阶梯厚度部位的黑度。如果有相同黑度的阶梯,则取此厚度为等效厚度。如果没有相同黑度值的阶梯厚度,则测量阶梯试块底片上一个比 C-276 板材底片黑度高的值和一个比 C-276 板材底片黑度低的值,通过插值法求得相同黑度的等效厚度值,如表 2 所示。

试验结果表明,在试验厚度范围内,哈氏合金与

表 2 等效厚度试验数据(厚度/ 黑度)

材料牌号	厚度	黑度	厚度	黑度	厚度	黑度	厚度	黑度
C-276	8	2.95	10	2.93	14	2.90	18	2.92
	15	3.20	19	3.12	24	3.36	30	3.28
20# 钢	19	2.21	24	2.25	30	2.31	36	2.51

低合金钢 16Mn 的射线透照等效系数 Ψ 接近 2, 且随着厚度的增加, Ψ 值逐渐减小。随着工件厚度的增加, 所用的射线能量增加, 工件对 X 射线的衰减系数减小, 散射比减小, 最终导致两种材料的射线透照等效系数随厚度的增加而减小, 如表 3 所示。

表 3 等效厚度

材料牌号	C-276	20# 钢
厚度/mm	8/10/14/18	16/20.1/26.6/32.8
射线透照等效系数 ϕ	2.0/2.0/1.9/1.82	

3 实际应用结果及分析

由于结构上的连续性, 两种不同材料焊接时, 常加工成等厚度对接形式如图 1 所示。以厚度 10 mm 的工件为例, C-276 材料与 16Mn 材料厚度相同, 由于射线透照等效系数 Ψ 等于 2, 透照 10 mm 的 C-276 工件需要相当于 20 mm 厚的 16Mn 工件的透照条件, 该工件等同于 10 与 20 mm 的同种 16Mn 材料对接, 厚度差远超常规射线检测质量控制范围所允许的厚度差(透照厚度比 K_s 不大于 1.4)。该工件的透照应采取大厚度比工件透照时相应技术措施。

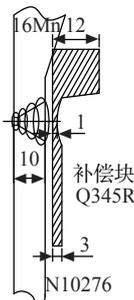


图 1 工件结构

大厚度比工件透照可采取的措施: 提高管电压、双胶片法和补偿法等。

提高管电压法: 选择管电压首先要考虑不能超过标准 JB/T 4730.2-2005 关于不同透照厚度允许的 X 射线最高管电压的规定, 其次考虑厚度宽容度的要求。对于图 1 的工件, 透照厚度为 20 mm 且厚度差较大时, 允许的最高管电压为 330 kV。要将工件不同厚度的两部分的黑度 D 均控制在标准 JB/T 4730.2-2005 规定的 2.0~4.0 的范围内; 根据胶片特性曲线如图 2 所示, 可知, $D_1=4.0$ 与 $D_2=2.0$ 对应的曝光量比值为 2; 查阅所用射线机的曝光曲线如图 3 所示可知, 透照厚度相差一倍的两工件所得黑度相同且满足标准要求所需曝光量的

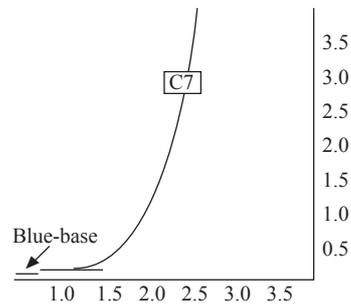


图 2 胶片特性曲线

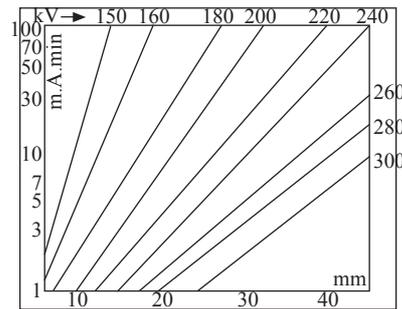


图 3 射线机曝光曲线

比值最小为 4, 远超标准黑度控制的曝光量比值 2。由此可见, 提高管电压的方法不能使用。

异速双胶片技术, 由于找到在有效黑度范围内曝光量有足够多重叠的两种胶片较困难。而同速比胶片技术, 要将底片黑度 D 控制在 1.3~4.0 范围内, 查胶片特性曲线可知两黑度对应的曝光量比值为 3.2, 还是小于所用射线机透照大厚度比工件所能提供的曝光量比值 4。由此可见, 双胶片技术也不能使用。

采用厚度补偿技术。根据图 1 中工件的实际厚度为 10 mm, 由于材质衰减系数差异原因, 导致两种等厚度异种材质工件有相当于 10 mm 的厚度差; 考虑焊接方法及焊接余高等因素, 制作了如图 4 所示的厚度补偿块。厚度补偿块不同厚度过渡部位用砂轮机修磨圆滑, 然后弯制成与工件曲率相近的弧形后紧贴工件放置进行厚度补偿。此时焊接接头不同部位有效透照范围的透照厚度比 K_s 控制了



图 4 厚度补偿块示意图

(下转第 43 页)

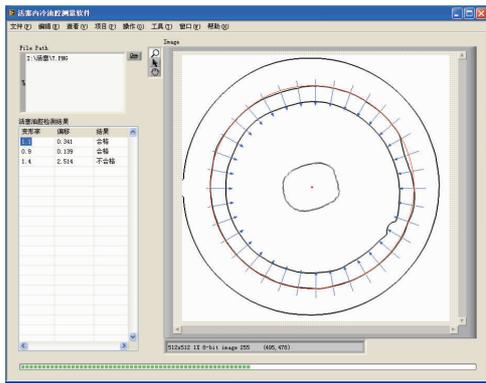


图9 软件运行界面

表1 活塞油腔偏移测量结果 mm

序号	活塞油腔偏移测量		
	自动测量	工人测量	三坐标测量机
1	0.514	0.6	0.521
2	1.643	1.5	1.642
3	0.128	0.2	0.119
4	5.286	5.1	5.293
5	1.644	1.7	1.651
6	2.936	2.8	2.931
7	1.155	1.3	1.158
8	2.743	2.8	2.749
9	1.112	1.1	1.116
10	4.987	5.0	4.985

(上接第 38 页)

1.4 以内。透照所得底片有效评定区的黑度控制在 2.3~3.5 的范围内,符合标准 JB/T 4730.2—2005 的规定。

4 结论

通过对哈氏合金(C-176)与 16Mn 两种材料对 X 射线衰减特性的分析,初步得出两种材料射线透照等效系数 $\Psi=1.54\sim 1.61$,综合考虑散射线的影响及不同厚度对散射比的影响, Ψ 值可能还要更大。

根据两种材料的射线透照等效系数,选择合适的透照条件,对两种材料的射线透照等效系数进行了试验。试验结果表明两种材料,在试验的厚度范围和射线能量范围内的透照等效系数接近于 2,且

5 结论

笔者提出了一种完整的活塞内冷油腔 CT 图像自动测量方法及实现,包括直方图均衡法、中值滤波、边缘增强、图像分割、边界提取以及油腔结构测量等。采用量化方法对油腔存在的问题进行分类识别测量。并通过编制软件实现,结果表明所提出的基于图像处理的活塞油腔测量精度在 0.1 mm 以内,平均每次测量时间 50 ms,稳定可靠,实现了对油腔的快速、精确测量,为活塞油腔测量提供了量化依据。

参考文献:

[1] 吕彩琴,苏铁熊. 活塞冷却油腔位置对活塞强度的影响[J]. 内燃机,2009,(1):4-9.
 [2] 王月,原彦鹏,张卫正,等. 冷却油腔位置改变对活塞温度场的影响[C]//中国内燃机学会第七届学术年会:论文集. 北京:同济大学出版社. 2007,10(1):477-480.
 [3] GUAN SH AN, GUO F L. A fast and accurate positioning algorithm of PCB location hole coordinate base on the potential function[C]//IEEE Environmental Science and Information Application Technology[s. l], 2010.

随着工件厚度的增加而减小。

实际工件属于大厚度比试件,射线透照检测采取厚度补偿技术特殊措施。根据射线透照等效系数,制作合适的厚度补偿块用于实际工件的射线透照检测,射线底片黑度得到很好的控制,全部符合标准的规定,保证检测结果的可靠性。

参考文献:

[1] 强天鹏. 射线检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2007(4):18-20,120.
 [2] 2010 ASME Boiler and Pressure Vessels Code Section II: Materials[S].
 [3] NB/T 47008—2010 承压设备用碳素钢和合金钢锻件[S].