

X 射线在钢板中的衰减规律试验研究

黄冬琴 鄂冠华 敖波

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室,江西南昌 330063)

摘要:在管电压和管电流不同的条件下,测量穿透不同厚度钢板后的剂量率,并利用 original 软件来对不同情况下测得的结果进行曲线拟合。试验结果表明:X 射线在穿过物体过程中的衰减规律符合连续谱射线在物体中的衰减规律;管电压相同,随着管电流的增大各块钢板中的平均线衰减系数几乎不变;管电流相同,随着管电压的增大各块钢板中的平均线衰减系数减小;穿透相同钢板厚度时,随着管电流或管电压增大剂量率也增大;散射射线在 X 射线没有穿透物体时对剂量率的影响比较明显。

关键词:X 射线检测;平均线衰减系数;剂量

中图分类号:TG115.28 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-4423(2010)02-031-04

在钢的提炼、热处理、锻造中和钢制品的使用中可能产生种类繁多、方向各异的缺陷。为保证钢制品的质量,必须对其进行多方位的 X 射线检测。随着技术的进步,数字射线检测技术是未来的发展趋势,常用的数字射线照相技术包括 DR(Digital Radiography)、CR(Computed Radiography)和工业 CT(Industrial Computed Tomography)。数字射线检测中的数字成像与胶片相对射线能量比较敏感,特别是射线 CR 技术。为保证数字射线检测的质量,选择合适的透照管电压和管电流就显得尤为重要。管电压、管电流的选择与 X 射线在钢中的衰减规律有关。因此,对 X 射线在钢板中的衰减规律的研究是非常必要的。

在实际工业射线检测中应用的 X 射线一般是宽束、连续谱射线其穿透物体时强度的衰减规律为:

$$I = (1 + n)I_0 e^{-\mu t} \quad (1)$$

式中 n —散射比,散射线强度与一次射线强度之比;
 μ —射线在工件中的线衰减系数,其值在射线穿过一定厚度物体的过程中是不断变化的,因此,在计算中常引入平均线衰减系数。

由于实验条件所限,强度和散射线的测量比较困难。剂量和强度都是能量,只是表示形式不同。因此,用剂量代替强度。试验中把散射线和一次射线看成一个整体进行研究。笔者通过测量穿透不同厚度冷轧钢板后的剂量,来研究 X 射线在冷轧钢板中的衰减规律。

1 X 射线穿过冷轧钢板中衰减规律试验

1.1 试验设备

(1) CD-300BX 型固定式工业 CT 射线机一台。

(2) TL3000A 剂量仪一台用于测量和读取剂量数据,读数精度为 0.01cGy。

(3) 钢板固定与准直装置一套。

1.2 试验对象

选用 10 块均质的冷轧长方体钢板。其尺寸为 200mm×200mm×1mm。

1.3 试验方法

试验过程中曝光时间为 1min;管电压分别为 100kV、120kV、140kV、160kV、180kV、190kV;管电流分别为 0.5mA、1.0mA、1.5mA、2.0mA、2.5mA、3.0mA、3.5mA、4.0mA、4.5mA、5.0mA、5.5mA。对于每一台 X 射线机的最大功率是固定的(即 $P_{\max} = UI = K$,其中 K 为一个固定的常数),因此,管电压越大管电流达到的最大值就越小。

步骤:

(1) 固定管电压 100kV,板厚 0mm,管电流从 0.5mA 开始,按上面管电流增大至射线机达到的最大值,每换一次电流记录一次穿透钢板后的剂量;

(2) 按上面列出的电压值增加管电压值,重复第(1)步;

(3) 增加 1 块钢板,重复第(1)、(2)步,增加钢板厚度至 10mm 为止。试验示意图如图 1 所示,图中从 X 射线机发出的射线为一束射线;剂量率 D_0 、 D_1 、...、 D_{10} 为穿透每块冷轧钢板所测得的剂量率,

下标表示钢板的数量。

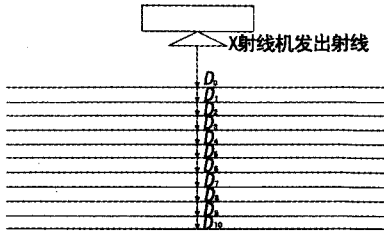


图1 试验示意图

2 结果与讨论

2.1 管电压、管电流与剂量率的关系

以两组数据为例,分别研究管电压和管电流与剂量率的关系。管电流 0.5 mA,不同管电压下透过不同厚度钢板测量的剂量率数据如表 1 所示。管电压为 100kV,不同管电流下透过不同厚度钢板所

测量的剂量率数据如表 2 所示。

表 1 管电流 $I=0.5\text{ mA}$ 时测得的透过剂量率

钢板个数	不同管电压下的透过剂量率($\text{cGy} \cdot \text{min}^{-1}$)					
	100kV	120kV	140kV	160kV	180kV	190kV
0	1.25	1.58	2.32	3.1333	3.97	4.3933
1	0.37	0.6433	1.007	1.5	2.03	2.43
2	0.1867	0.3667	0.64	1.007	1.4333	1.72
3	0.11	0.22	0.453	0.74	1.08	1.3
4	0.07333	0.16	0.32	0.57	0.8433	1.003
5	0.05	0.12	0.24	0.46	0.6867	0.8333
6	0.04	0.09	0.19	0.35	0.53	0.69
7	0.03	0.07	0.16	0.28	0.48	0.5733
8	0.02	0.06	0.12	0.23	0.38	0.4767
9	0.02	0.04	0.1	0.1867	0.35	0.44
10	0.01	0.04	0.087	0.16	0.3	0.38

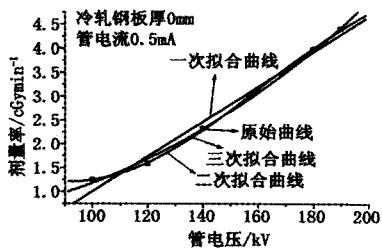
注:各钢板尺寸和密度均相同

表 2 电压 $U=100\text{ kV}$ 时测得的透过剂量率

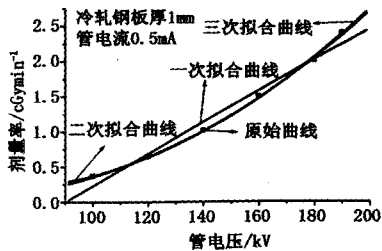
钢板个数	不同管电流(mA)下的透过剂量率($\text{cGy} \cdot \text{min}^{-1}$)										
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
0	1.25	2.307	3.407	4.627	5.753	6.907	8.057	9.2	10.327	11.437	12.6
1	0.37	0.653	1	1.31	1.6	1.9	2.26	2.57	2.91	3.19	3.53
2	0.187	0.34	0.49	0.64	0.8	0.96	1.12	1.29	1.443	1.607	1.76
3	0.11	0.193	0.283	0.373	0.47	0.55	0.65	0.74	0.82	0.91	1.01
4	0.073	0.13	0.18	0.24	0.29	0.34	0.4	0.45	0.503	0.56	0.62
5	0.05	0.09	0.13	0.17	0.2	0.23	0.27	0.3	0.34	0.37	0.4
6	0.04	0.06	0.09	0.113	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22	0.25	0.28
7	0.03	0.05	0.07	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.15	0.17	0.18
8	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12	0.13
9	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.1
10	0.01	0.02	0.027	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07

管电流为 0.5 mA 时,剂量与管电压关系数据拟合曲线如图 2 所示。

管电压为 100kV 时,剂量与管电流的关系数据拟合曲线如图 3 所示。

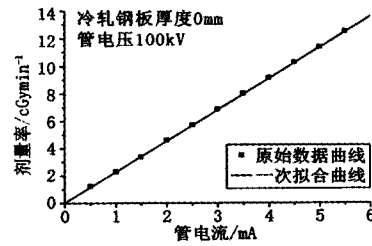


(a) X射线穿透0mm冷轧钢板

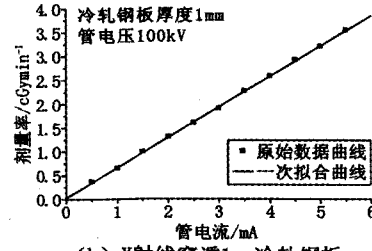


(b) X射线穿透1mm冷轧钢板

图 2 试验示意图



(a) X射线穿透0mm冷轧钢板



(b) X射线穿透1mm冷轧钢板

图 3 剂量与管电流关系拟合曲线

从表 1 和图 2 中可以看出,管电流和钢板厚度相同时,剂量率随着管电压的增大而增大,且成二次线性关系。管电压增大相当于增大了 X 射线的能量,而剂量率是一种能量的表示。从图 2 中还可以看出,X 射线经过 1mm 冷轧钢板衰减后,三次拟合曲线和二次拟合曲线效果相同,且与原始曲线几乎相同。从表 2 和图 3 中可以看出,管电压和钢板厚度相同时,剂量率随着管电流的增大而增大且成一次线性关系。这与石成英、王玉玲等研究射线(包括 X 射线和 γ 射线)在炸药柱中衰减规律,得出的剂量与管电流成二次线性关系的结论不太一样,也许是仪器或测量方法的不同所造成的。管电流的增大相当于增多了连续谱的光子数,光子数的增多,意味着单位时间、单位体积内总能量增大,从而导致剂量率的增大。从表 1 和表 2 中都可以看出,管电流和管电压相同时,剂量率随着板厚的增大而减少,但减少量越来越少直至 0(即 X 射线没有穿透钢板)。根据上面的拟合曲线,可以计算出在某一管电流下,得到某一剂量所需的管电压。或在管电压固定的情况下,计算出得到某一剂量所需的管电流。

2.2 钢板的平均线衰减系数与管电压、管电流的关系

将散射线和一次射线看成整体,X 射线穿过每一块钢板时将 X 射线看成是单色窄束射线,将测量的剂量率代入公式(1),算出 X 射线穿过每块钢板的平均线衰减系数。以 X 射线穿过第一块为例,如图 4 所示。

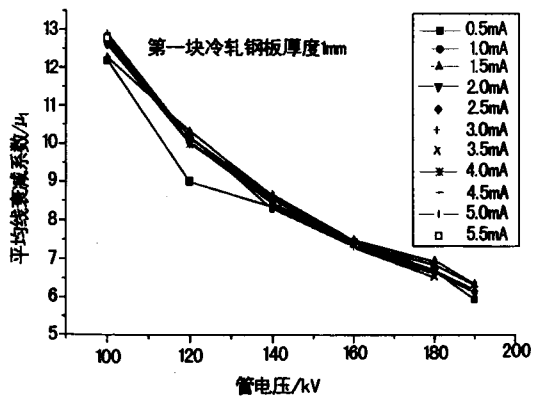


图 4 X 射线在第一块板中的平均线衰减系数与管电压的关系

从图 4 可以看出 X 射线在第一块钢板中的平均线衰减系数随着管电压的增大而减少,但平均线衰减系数的减少速率逐渐降低。随着管电压的增

大,X 射线中波长较长的射线所占比例逐渐减小,而射线在冷轧钢板中的衰减主要是冷轧钢板对射线中较长波长的吸收衰减,因此,在每块钢板中的平均线衰减系数随着管电压的增大而减小。随着管电压的增大,射线能量逐渐趋于单色射线能量(即衰减系数逐渐趋于一个固定值),因此,每块钢板中的平均线衰减系数减少速率逐渐降低直至 0。X 射线在一块冷轧钢板中的平均线衰减系数随着管电流的增大几乎不变。管电流只影响 X 射线中的光子数,与 X 射线的波长没有关系。因此,管电流的变化对冷轧钢板中的平均线衰减系数没有影响。

2.3 剂量率与每块钢板平均线衰减系数关系

由 2.2 结论可知,随着管电流的增大每块钢板中的平均线衰减系数几乎不变。因此,以管电流不变,改变管电压,研究穿过每块钢板前的剂量率与每块钢板衰减系数关系。以 $I = 0.5\text{mA}$ 为例,如图 5 所示。图中 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{10}$ 表示每块钢板中的平均线衰减系数,其中下标表示穿过的第几块冷轧钢板,且与图中每条线上的点相对应。

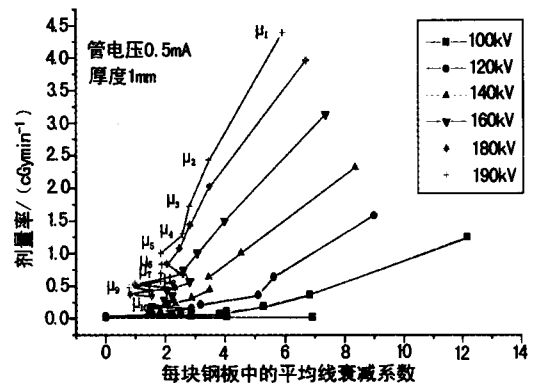


图 5 X 射线穿过每块钢板前的剂量率与每块钢板中的平均线衰减系数的关系

从图 5 可以看出,随着厚度的增大,穿过每块钢板前的剂量率(即穿过前一块钢板后的剂量率)不断减小,同时,X 射线在每块钢板中的平均线衰减系数也不断减小。两者的减小量都在不断降低。图 5 中 X 射线穿过每块钢板前的剂量率与 X 射线在每块钢板中的衰减系数的关系与连续谱穿过物体后强度分布的变化相一致。在连续谱穿过物体后强度分布的变化中,随着穿透厚度的增加,X 射线强度不断减小,同时,射线的波长也不断减小。这也证明了,可以用测量剂量代替测量射线强度。X 射线在物质中的平均线衰减系数随着射线波长的减小而减小。

随着穿透厚度的增大,射线的等效能量提高,射线发生“硬化”,衰减系数减小,衰减系数的减小量越来越小,衰减系数逐渐趋向于一个定值。连续谱线近似成为单色射线。由于衰减系数的减少,穿透的剂量率的减少量也不断减少。如果不考虑散射线和剂量仪灵敏度的影响,随着厚度的不断增加剂量率最后为零。

3 结论

1)将物体在射线穿透方向上的厚度分割成几块厚度的叠加,散射线和一次射线看成整体,利用单色、窄束射线穿透物体时强度的衰减规律研究宽束、连续谱射线在物体中的衰减规律,其结果与理论上宽束、连续谱在物质中的一般衰减规律相一致。

2)在管电压和管电流不变的情况下,宽束、连续谱射线在冷轧钢板中的平均线衰减系数随穿透厚度

的增加而不断减小且减小量逐渐减少。最后平均线衰减系数为一个定值。这时的连续谱射线近似成为单色射线。

3)在管电流和板厚相同的情况下,X射线在冷轧钢板中的平均线衰减系数随着管电压的增大而不断减小,最后衰减系数近似为一定值。在管电压和板厚相同的情况下,X射线在冷轧钢板中的平均线衰减系数随着管电流的增大几乎不变。

4)在板厚不变的情况下,穿透钢板所测得剂量率随着管电压或管电流的增大而增大。

根据上述规律,我们可以通过更进一步的曲线拟合和计算,选出穿透一定厚度冷轧钢材所需的管电压和管电流。还可以根据各种金属材料之间的等效系数,计算出穿透一定厚度的其他金属材料所需的管电压和管电流。

参考文献(略)

(上接第 30 页)

检测的情况来看,没有发现裂纹缺陷;焊缝表面根据 ASME 标准第八卷附录八进行评定,热处理前主要检查焊接缺陷,热处理后主要检查有无裂纹缺陷。下面就缺陷的种类及处理方法做以介绍:

焊缝表面在热处理前的主要缺陷痕迹:

(1)未熔合:层间未熔合和边缘未熔合,直线状的红色显示。一般为 5mm~10mm 长;

(2)气孔:大于 4.8mm 的单个气孔,圆形的红色显示,气孔大于 3mm 时,有时没有红色显示,肉眼可见。

(3)磨削裂纹:焊缝表面用砂轮机打磨,磨削量过大时,会产生磨削裂纹,比较浅,其方向基本上垂直磨削方向,并沿晶界分布或呈网状,渗透探伤时缺陷痕迹呈红色断续条纹或网状条纹;

(4)密集气孔:气体保护不好时产生,在一个区域内,有数个小气孔组成,肉眼可见,渗透探伤时,呈间距小于 1.6mm 数个圆形显示;

(5)咬边:焊接时,由于电流过大,在焊缝边缘处产生,渗透探伤时,断续地、直线状的红色显示,有时肉眼可见。

对于上面缺陷进行打磨处理,直到把缺陷清除干净,进行 PT 探伤确认,缺陷清除进行焊接、打磨,

再进行 PT 探伤,直到合格。

焊缝表面在热处理后的主要缺陷痕迹:横向裂纹,这是焊缝热处理后的主要缺陷,是由于焊缝厚薄不均,纵向收缩力大造成的。缺陷痕迹为红色的垂直于焊缝的线性显示,当裂纹深度大时,渗透液会溢出。这种缺陷处理不能完全靠打磨来消除,如果缺陷深时,是打磨不掉的。处理的过程是:对于所发现的横向裂纹,进行超声波探伤,确定缺陷的深度,深度在 20mm 以内时,进行打磨处理;深度超过 20mm 时,要用碳弧气刨清除缺陷,打磨后进行 PT 探伤确认。缺陷清除后,严格按照工艺要求进行焊接,打磨后,进行 UT、PT 探伤。

5 结论

由于水轮机转轮结构的原因,渗透探伤是控制水轮机转轮表面质量的主要方法,每次渗透探伤的面积为 150m² 左右,采用水洗型着色渗透探伤方法,灵敏度虽然较低,但通过选用好的探伤材料,严格遵守和不断完善检测规程,可以弥补水洗型渗透探伤方法的不足。通过 10 台水轮机转轮的探伤证明,采用的检测工艺是正确的,探伤灵敏度能够满足标准要求。