

# CLF-1 钢 X 数字射线照相等效系数的确定

王学芹 王晓宇 武兴华 廖洪彬

(核工业西南物理研究院, 成都 610225)

**文 摘** 针对聚变堆结构材料拟采用的新材料 CLF-1 (low-activated ferritic/martensitic steel) 钢在进行射线检测过程中没有特定标准参考的问题, 采用等效法在相同透照条件开展了不同厚度 CLF-1 钢和 Q235 钢的 X 数字射线等效透照实验研究。基于相同成像条件下两种材料对应的 X 射线图像具有相同灰度即透照系数相同, 通过对比拥有相同图像灰度值的两种材料的厚度, 得出 CLF-1 钢对应于 Q235 钢的等效透照系数。试验设计了 4~20 mm, 递增 0.5 mm 的阶梯厚度的 CLF-1 钢和 Q235 钢在 100~400 kV (递增 50 kV) 管电压条件下进行了透照实验, 获得了对应电压下 CLF-1 钢相对于 Q235 钢的 X 射线透照等效系数为 1.10~1.13。该研究结果对 CLF-1 钢在进行 X 射线检测时的检测技术参数的确定具有指导意义。

**关键词** CLF-1 钢, Q235 钢, X 数字射线成像, 等效系数

中图分类号: TG115.28

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.02.015

## Determination of Equivalent Coefficient of X-ray Digital Radiographic for CLF-1 Steel

WANG Xueqin WANG Xiaoyu WU Xinghua LIAO Hongbin

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225)

**Abstract** This paper focuses on the problem that CLF-1 (low-activated ferritic/martensitic steel), a new material to be used as the structural material of the fusion reactor, has no specific standard reference in the process of X-ray detection. The X-ray digital radiography equivalent translucency of CLF-1 steel and Q235 steel with different thickness is studied by using the method of equal effects under the same translucency condition. Based on the same imaging condition, the corresponding X-ray images of the two materials have the same gray value, that is, the transmittance coefficient is the same. By comparing the thickness of the two materials with the same gray value of the image, the equivalent transmittance coefficient of CLF-1 steel corresponding to Q235 steel is obtained. In this paper, test pieces of CLF-1 steel and Q235 steel with thickness from 4 mm to 20 mm, step increased by 0.5 mm, are designed. The translucency test was carried out under the condition of 100 kV to 400 kV (step increased by 50 kV) tube voltage, and the equivalent coefficient of X-ray transmittance of CLF-1 steel relative to Q235 steel under the corresponding voltage was obtained to be 1.10 to 1.13. The results of this paper are instructive to the determination of technical parameters of X-ray detection of CLF-1 steel.

**Key words** CLF-1 steel, Q235 steel, X-ray digital radiography, Equivalent coefficient

### 0 引言

国际热核聚变实验堆 (international thermonuclear experiment reactor, ITER) 是世界上第一个热核聚变实验堆<sup>[1]</sup>, 它的发展受到人们的高度关注。低活化铁素体/马氏体 (RAFM) 钢因为具有辐照肿胀和热膨胀系数低、热导率高等优势, 作为未来聚

变示范堆的首选结构材料目前已被普遍认可, 解决了限制聚变堆发展的材料问题<sup>[2]</sup>。为了配合 ITER TBM (中国氦冷固态实验包层模块) 的设计研究, 核工业西南物理研究院联合其他几家合作单位, 开发了一种新的 RAFM 钢——CLF-1 钢<sup>[3]</sup>。目前 CLF-1 钢也是中国聚变工程实验堆 (CFETR) 氦冷固态产氦

收稿日期: 2019-06-19

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2017YFE0300601 和 2017YFE0300503)

第一作者简介: 王学芹, 1989 年出生, 硕士研究生, 研究方向为材料无损检测。E-mail: wangxq@swip.ac.cn

包层首选结构材料之一。根据CFETR氦冷产氚包层的设计要求,对其进行无损检测,进行质量监控、缺陷跟踪及评价缺陷是否扩展等尤为重要。其无损检测要求是优先选择射线检测,射线检测不可达时再用超声检测方法作为补充。CLF-1钢为特定使用需求研发的新材料,在射线检测时曝光条件的选用缺乏必要数据。射线照相等效系数,可用于从其他金属已知曝光技术来确定某种金属的曝光条件。传统的射线照相等效系数的确定,采用同时照相法<sup>[4]</sup>,需要用到胶片,而胶片的冲洗过程不一致可能给数据的测量带来误差。而数字射线成像技术,不需要胶片,几秒的时间就可以得到影像,从影像上即可得到影像灰度,方法简单、易操作。

本文针对CLF-1钢射线照相等效系数不明确的问题,探索采用数字射线成像技术,测试CLF-1钢与Q235钢的等效系数。根据射线照相等效系数,从Q235钢的已知曝光技术来确定CLF-1钢的曝光条件,对以CLF-1钢为结构材料的产氚包层的射线检测时曝光技术及像质计的选择,具有一定的指导意义。

## 1 试验原理

随着数字化技术的发展,数字化射线成像技术目前已经成为一种方便快捷的射线检测方法,相应检测方法标准已出版<sup>[5]</sup>。试验采用新近发展起来的全新的数字化成像技术——数字平板直接成像技术。数字平板技术不同于传统的射线照相方法,它不需要胶片,而是通过计算机处理直接成像,速度和效率明显提高;同时,数字平板成像区域均匀,几乎无边缘几何变形,空间分辨率较高,灵敏度高,图像质量与胶片图像水平基本一致。

传统的射线检测方法,当采用同一参数同时照相时,底片的黑度仅与透照厚度相关,且保持指数相关<sup>[6-7]</sup>。数字平板直接成像技术的影像灰度值,由公式(1)<sup>[8]</sup>给出:

$$G = \alpha AU^2 e^{-\mu T} / F^2 \quad (1)$$

式中, $G$ 为影像灰度, $\alpha$ 为与检测系统有关的常数, $A$ 为管电流, $U$ 为管电压, $\mu$ 为材料线衰减系数, $T$ 为透照厚度, $F$ 为焦距。

对于管电压、管电流和焦距,当透照参数一定时,此三者即固定。 $\alpha$ 值是检测系统有关的一个常数,影响因素有像素尺寸、闪烁体材料、光/点(O/E)转换位数和模/电(A/D)转换位数等,个别测得数据可能会有波动,但是整体表现为趋于一个常数。 $\mu$ 与射线强度、物质的原子序数和密度有关,当被检件与透照条件确定,则射线强度及材料确定, $\mu$ 趋于一个固定的常数。因此,当采用同一试验设备、相同曝光条

件,则此时呈现出的影像灰度仅与透照厚度相关。

## 2 试验实施与结果分析

### 2.1 试验过程

采用MXR-P/11型X射线管,最大管电压可达450 kV,小焦点0.4 mm,大焦点1.0 mm;XRD P型平板探测器,单个像素几何尺寸为0.2 mm,图像动态范围大于88 dB,扫描速度在0.1~2.0 m/min内可调,实时成像帧数高于30帧;XYD-450型实时成像检测系统。试块为不同厚度的CLF-1钢及Q235钢阶梯试块,厚度范围为4~20 mm,厚度增量为2 mm;特制厚度分别为0.5、1和1.5 mm的CLF-1钢薄片,减小CLF-1钢阶梯试块的梯度,使其厚度增量为0.5 mm。

在适当试验条件下,分别对CLF-1钢和Q235钢试验试块进行透照,记录影像灰度值,并根据不同阶梯厚度对应影像灰度值,分析灰度与透照厚度之间的关系。

### 2.2 CLF-1钢试验结果与分析

在前焦距 $F_1=1$  m,后焦距 $F_2=0.5$  m,管电流3 mA,透照电压100~400 kV,步增50 kV的试验条件下,将CLF-1钢放置在适当位置(标记位置,确保每次放置于同一位置),对其进行透照,并利用图像处理软件测得不同厚度CLF-1钢的影像灰度(测3次,取平均值),检测结果记录于表1中。

由表1可以看出,100 kV的透照电压下,获得的4~5 mm厚的CLF-1钢影像灰度低,其信噪比低,即便通过图像处理,增加灰度,其对比度和灵敏度也没有明显提高;在150~400 kV内,相同透照电压下,随着透照厚度的增加,CLF-1钢影像的灰度相应减小,且减小的幅度也相应减少,直至透照厚度大到一定程度,在透照厚度增量只有0.5 mm的情况下,减小的幅度很小,即影像灰度保持基本不变;在同样的透照厚度,CLF-1钢影像的灰度随着透照电压的增加相应增大,且增大的幅度也相应增加。根据表1中数据绘制不同透照电压下CLF-1钢的影像灰度与透照厚度的关系曲线。由公式(1)知道,固定检测系统、统一透照条件下,影像灰度与透照厚度之间成指数相关,对表1数据进行指数拟合,拟合公式及相关系数见图1(100 kV透照电压除外)。

由图1可知,相关系数范围为 $R^2=0.9956\sim 0.9988$ ,表明CLF-1钢透照厚度与影像灰度指数拟合高度相关,这与公式(1)的结果吻合。图1中的拟合结果显示,误差点都是出现在透照厚度较小的那一段,对于多色射线,线衰减系数 $\mu$ 是一个变量<sup>[9]</sup>,而实验中默认成常量,故而有此误差。由图1中各电压下的影像灰度与透照厚度之间的拟合公式知,当确定影像灰度时,对公式两边分别取自然对数,即可得

表1 不同透照电压下 CLF-1 钢的影像灰度

Tab. 1 Image gray level of CLF-1 steel under different transillumination voltage

厚度 /mm	100 kV,3 mA 灰度	150 kV,3 mA 灰度	200 kV,3 mA 灰度	250 kV,3 mA 灰度	300 kV,3 mA 灰度	350 kV,3 mA 灰度	400 kV,3 mA 灰度
4	56	714	1791	-	-	-	-
4.5	32	552	1467	-	-	-	-
5	6	449	1250	-	-	-	-
5.5	-	342	1028	-	-	-	-
6	-	279	892	1675	-	-	-
6.5	-	226	771	1475	-	-	-
7	-	183	669	1306	-	-	-
7.5	-	137	567	1148	-	-	-
8	-	102	474	997	1604	-	-
8.5	-	-	416	890	1445	-	-
9	-	-	359	791	1297	1882	-
9.5	-	-	317	710	1174	1701	-
10	-	-	275	638	1073	1565	2096
10.5	-	-	237	577	977	1437	1918
11	-	-	199	500	864	1283	1736
11.5	-	-	176	455	794	1181	1546
12	-	-	153	409	732	1101	1492
12.5	-	-	133	373	670	1014	1385
13	-	-	112	330	607	928	1285
13.5	-	-	-	304	563	864	1198
14	-	-	-	265	506	785	1101
14.5	-	-	-	248	473	731	1018
15	-	-	-	213	427	672	952
15.5	-	-	-	198	393	623	877
16	-	-	-	171	355	574	819
16.5	-	-	-	158	327	532	750
17	-	-	-	137	296	489	705
17.5	-	-	-	127	280	458	657
18	-	-	-	119	259	433	628
18.5	-	-	-	-	245	403	582
19	-	-	-	-	225	376	553
19.5	-	-	-	-	218	355	514
20	-	-	-	-	204	348	510

到影像灰度所对应的透照厚度。

以下对 CLF-1 钢影像灰度与透照厚度之间的对应关系进行实验验证:采用同样的阶梯试块,在绘制曲线的透照厚度段前后共取 5 个厚度值进行实测检验,检验结果与计算影像灰度对应结果见表 2。

由表 2 可知,不同透照电压对应的计算厚度与实际厚度之间的误差有所不同。具体如下:200 kV 透照电压对应的平均相对误差最小,为 1.1%;300 kV 透照电压对应的平均相对误差最大为 8.4%。由表 2 中不同厚度与计算厚度的误差可以看出,所测厚度

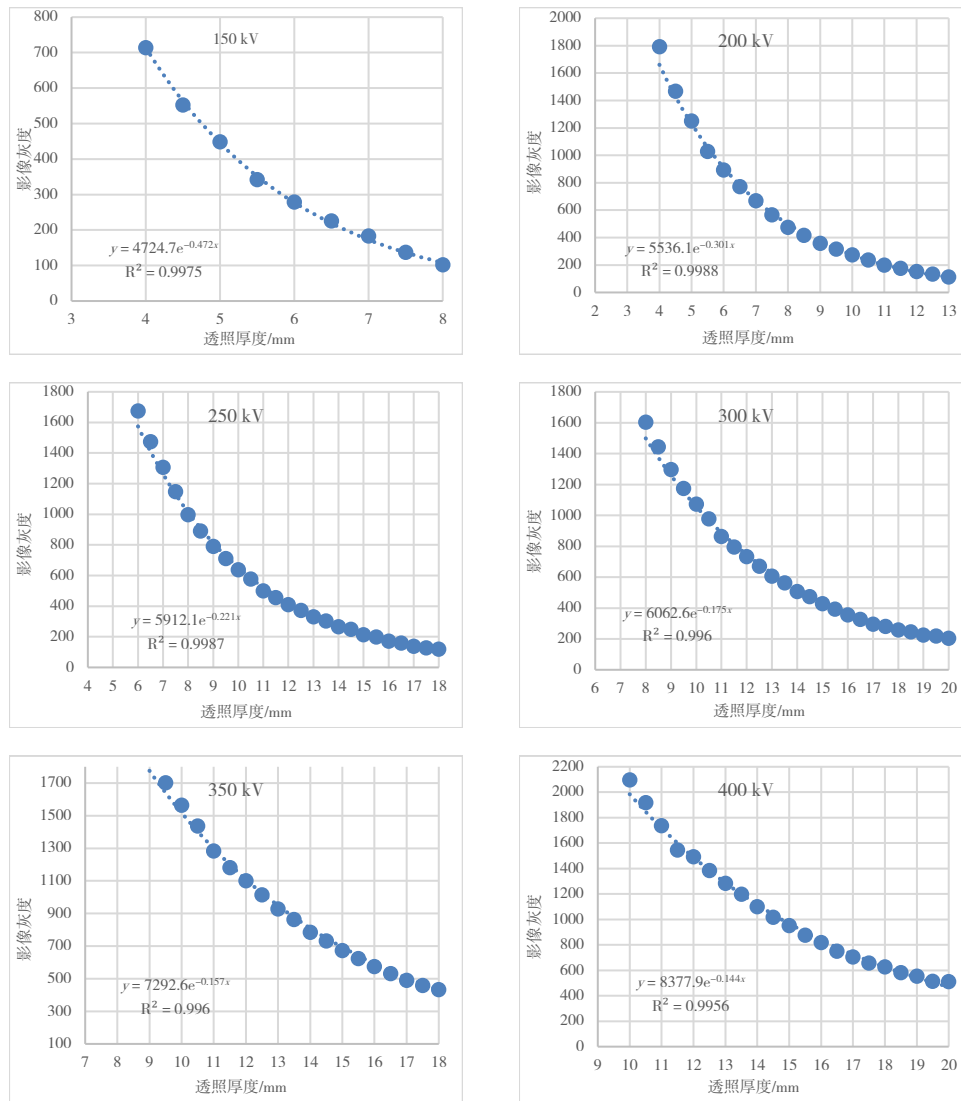


图1 不同透照电压下CLF-1钢影像灰度与穿透厚度的关系曲线

Fig. 1 Relationship between gray level and penetration thickness of CLF-1 steel image under different transillumination voltage

表2 计算透照厚度与实测厚度结果对应比较

Tab. 2 Comparison between calculated and measured thickness

150 kV				200 kV			
影像灰度	计算厚度/mm	实际厚度/mm	误差/mm	影像灰度	计算厚度/mm	实际厚度/mm	误差/mm
78	8.7	8.5	-0.2	100	13.3	13.5	0.2
59	9.3	9	-0.3	81	13.9	14	0.1
45	9.9	9.5	-0.4	69	14.4	14.5	0.1
37	10.3	10	-0.3	55	15.2	15	-0.2
18	11.8	10.5	-0.3	47	15.7	15.5	-0.2
250 kV				300 kV			
影像灰度	计算厚度/mm	实际厚度/mm	误差/mm	影像灰度	计算厚度/mm	实际厚度/mm	误差/mm
2228	4.4	5	0.6	2556	4.9	6	1.1
1888	5.1	5.5	0.4	2027	6.3	7	0.7
110	17.9	18.5	0.6	197	19.6	20.5	0.9
98	18.4	19	0.6	188	19.8	21	1.2
87	18.9	19.5	0.6	181	20.1	21.5	1.4
350 kV				400 kV			
影像灰度	计算厚度/mm	实际厚度/mm	误差/mm	影像灰度	计算厚度/mm	实际厚度/mm	误差/mm
2812	6.1	7	0.9	2971	7.2	8	0.8
2245	7.5	8	0.5	2481	8.5	9	0.5
328	19.8	20.5	0.7	482	19.9	20.5	0.6
312	20.1	21	0.9	449	20.3	21	0.7
296	20.4	21.5	1.1	440	20.5	21.5	1

与曲线拟合的透照厚度段差距越小,则误差越小;差距越大,则误差越大。线衰减系数与厚度相关,以及灰度读取点不同是造成误差的主要原因。

对于误差的控制,从上述分析提出措施,多做数据,对数据进行分析,提出根据透照厚度段不同给予计算厚度补偿;阶梯试块的阶梯进一步细化,使拟合曲线更加准确;灰度测量时,多点取平均值,以减小随机误差等。

### 2.3 Q235钢试验结果与分析

表3 不同透照电压下Q235钢的影像灰度

Tab. 3 Image gray level of Q235 steel under different transillumination voltage

厚度/mm	150 kV,3 mA 灰度	200 kV,3 mA 灰度	250 kV,3 mA 灰度	300 kV,3 mA 灰度	350 kV,3 mA 灰度	400 kV,3 mA 灰度
4	863	2066	-	-	-	-
6	388	1118	2003	2976	-	-
8	187	651	1261	1959	2706	-
10	-	392	830	1341	1908	2494
12	-	238	559	935	1374	1835
14	-	141	376	671	997	1362
16	-	-	256	480	733	1024
18	-	-	182	358	561	797
20	-	-	149	289	451	643

### 2.4 等效系数确定

一种材料的射线照相等效系数 $\psi$ ,是指将该材料的厚度乘以此系数后,即可得出与它具有相同吸收程度的“标准”材料的厚度。具体是指在一定管电压下,达到相同的射线吸收效果(或者说是获得相同底片黑度)的标准材料的厚度 $T_0$ 与被检材料的厚度 $T_m$ 之比,即 $\psi=T_0/T_m$ <sup>[10]</sup>。采用数字化射线成像技术,以影像灰度相等作为判断射线吸收效果相同的标准。即在影像灰度相同时,Q235及CLF-1钢所对应的透照厚度互为等效厚度。

选取表3中Q235钢不同透照电压下,对应影像灰度在1000左右的不同厚度值 $T_0$ ,将其对应的灰度带入图1中对应电压下的拟合公式中,计算相同灰度下对应的CLF-1钢的等效厚度 $T_m$ ,计算结果见表4。

由表4可以看出,CLF-1钢的射线吸收率要高于Q235钢,即达到同样的影像灰度,CLF-1钢的透照厚度小于Q235钢;还可以看出,不同透照电压下的CLF-1钢与Q235钢的数字射线检测透照等效系数不同。CLF-1钢采用与本实验相同的数字射线检测系统时,可采用本实验的结果;检测系统不同时,根据检测要求的精度,可采用本实验结果,亦可采用本实验中射线等效系数的获得方法,通过实验绘制相应

采用与CLF-1钢完全相同的透照条件,对Q235钢阶梯试块进行试验,得到不同厚度Q235钢的影像灰度,结果见表3。Q235钢的影像灰度与CLF-1钢影像灰度变化趋势一致,同样是相同透照电压下,影像灰度随着透照厚度的增加而减小,且减小的幅度随着透照厚度的增加而减小;同一透照厚度,影像灰度随着透照电压的增加而增大,且增大的幅度随着透照电压的增加而相应增加。

的关系曲线,得到等效系数。在150~400 kV内的不同透照电压下,CLF-1钢相对于Q235钢的X数字射线照相等效系数为1.10~1.13。

表4 等效系数计算结果

Tab. 4 Calculation results of equivalent coefficient

透照电压 /kV	Q235钢透照厚度/mm	CLF-1钢透照厚度/mm	射线透照等效系数 $\psi$
150	4	3.6	1.11
200	6	5.3	1.13
250	10	8.9	1.12
300	12	10.7	1.12
350	14	12.7	1.10
400	16	14.6	1.10

### 3 结论

通过试验测试了CLF-1钢在不同透照电压下,其影像灰度与透照厚度之间的对应关系;并对其拟合公式进行验证,不同透照电压下,计算厚度与实际厚度之间最大的相对误差为8.4%,最小相对误差为1.1%。CLF-1钢影像灰度与透照厚度之间的对应关系可用于通过X射线数字检测影像灰度来间接测量工件的厚度。



通过试验知,在150~400 kV内的不同透照电压下,CLF-1钢相对于Q235钢的X数字射线照相等效系数为1.10~1.13。该系数可为CLF-1钢制设备的数字化射线检测时曝光条件及像质计的选取提供必要数据。

#### 参考文献

[1] AYMAR R. Status of ITER project [J]. Fusion engineering and Design, 2002, 61-62: 5-12.

[2] EHRLICH K, BLOOM E E, KONDO T. International strategy for fusion materials development [J]. Journal of Nuclear Materials, 2000, 283-287: 79-88.

[3] WANG Pinghuai, CHEN Jiming, FU Haiying, et al. Technical Issues for the fabrication of a CN-HCCB-TBM based on RAFM steel CLF-1 [J]. Plasma Science and Technology, 2013, 15(2): 133-136.

[4] 蔡润生,袁生平,任华友. 射线透照等效系数测试方法分析[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(4): 86-89.

CAI Runsheng, YUAN Shengping, REN Huayou. Analysis of radio graphic equivalent factor test method [J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(4): 86-89.

[5] 中国国家标准化管理委员会. 无损检测 X射线数字成像检测 检测方法: GB/T 35388-2017 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2018.

China national standardization management committee. Non-destructive testing—X-ray digital radiography—practice: GB/T 35388-2017 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's

Republic of China, 2018.

[6] 蔡润生. 基于普通X射线机的厚度测量[J]. 中国测试, 2012, 38(6): 23-25.

CAI Runsheng. Measure thickness with industrial X-ray machine [J]. China Measurement & Testing Technology, 2012, 38(6): 23-25.

[7] 赵付宝,王从科,汤振鹤,等. 陶瓷材料与铝合金数字射线检测等效系数的确定[J]. 无损检测, 2018, 40(7): 39-42.

ZHAO Fubao, WANG Congke, TANG Zhenhe, et al. Determination of equivalent coefficient of digital ray detection for ceramic materials and aluminum alloy [J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(7): 39-42.

[8] 郭文明,陈宇亮. X射线图像灰度值与透照厚度之间的定量关系[J]. 无损检测, 2016, 38(2): 14-17.

GUO Wenming, CHEN Yuliang. Quantitative relationship between gray value of X-ray image and radiographic thickness [J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(2): 14-17.

[9] 强天鹏. 射线检测[M]. 第二版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007: 33-40.

QIANG Tianpeng. Radiographic testing [M]. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: China Labour and Social Security Publishing House, 2007: 33-40.

[10] 熊秀文. 关于射线透照等效系数[J]. 无损探伤, 1997(6): 46-48.

XIONG Xiuwen. About the equivalent coefficient of radiography [J]. Nondestructive Inspection, 1997(6): 46-48.