

热中子照相灵敏度的估算

汤 明

(北京航空航天大学材料学院 北京 100083)

摘 要 由 X 光胶片特性曲线推导出中子照相反差公式,应用此公式,可以估算使用指示剂的最佳用量,以及用此剂量指示剂进行中子照相所能发现缺陷的反差值。由此可以更好地控制中子照相的质量,即更好地控制产品的质量,同时还介绍了中子照相总不清晰度的估算方法。

关键词 中子照相,灵敏度,反差

Estimation of Thermo-neutron Radiographic Sensitivity

Tang Ming

(Institute of Material Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083)

Abstract From characteristic curve of X-ray film, the neutron radiographic contrast formulas are developed. Optimum value of applied indicator can be determined from these formulas to evaluate the neutron radiograph contrast value of defect. So the quality of neutron radiograph and relevant products under NDT can be well controlled. The method to estimate total indistinctness of is also introduced.

Key words Neutron radiography, Sensitivity, Contrast

由于物质对中子的衰减与物质的原子序数无关,而只与物质的核结构有关,对某些元素,如氢、锂、硼、镉、铀、钷、钆、金、银、钷、铟等,它们对热中子有很强的衰减;而对自然界大多数其它元素,中子衰减系数很低;因此与 X 射线照相相比,对于检测轻元素物质、重元素物质、被重元素物质包裹的轻元素物质及区分同位素或原子序数相近的元素,利用中子照相技术,有其独特优越性。目前中子照相技术在先进工业化国家已被广泛应用于航空空芯涡轮机陶瓷型芯无损检测(NDT)、核燃料棒 NDT、各种火工制品和非金属元部件 NDT。由于受中子源反应堆(实验堆)少所限,我国中子照相技术应用还不普遍,因此很多从事上述元部件工艺设计和制造人员、NDT 人员对中子照相应用的可行性、灵敏度范围等不很了解。为此本文对中子照相的灵敏度估算作基

本介绍,借以推广此项技术。

1 灵敏度估算的公式

影响中子照相灵敏度的主要因素是反差 D 和底片分辨率。而表述底片分辨率主要指标是底片的总不清晰度 U_T 。

1.1 估算底片反差 D 的公式推导

表述 D 的公式是由对胶片特性曲线表达式^[1]进行微分得来的:

$$D = (\log E_f - \log E_i) \quad (1)$$

式中, D 为底片黑度, K 为胶片反差系数, E_i 为胶片惰性值, E_f 为胶片获得的能令其感光的累积能量。

对中子照相而言 $E_f = t e^{-\mu x}$, 式中 t 为到达照相装置平面前单位面积单位时间热中子个数; t 为热中子对被照工件辐照时间; μ 为被照工件线衰减系数; x 为被照工件厚度,对(1)式进行微分有:

收稿日期:2002-03-25;修回日期:2002-07-16

汤明,1942 年出生,高级工程师,主要从事材料的无损检测研究工作

$$D = \frac{E_f}{E_f \ln 10} \quad (2)$$

此时我们考虑 μ 和 x 均为变量的情况:

$$D = -0.434 (\mu x + x \mu) \quad (3)$$

当被照工件含有空腔类型缺陷时, x 为负值:

$$D_{\text{空}} = +0.434 \mu x \quad (4)$$

当被照工件中含有疏松(穿透)型缺陷时, μ 为负值:

$$D_{\text{疏}} = +0.434 x \mu \quad (5)$$

当被照工件中存在异质夹杂物缺陷时, 可以先把被照工件缺陷分解成一部分为空腔, 一部分为异质夹杂物两部分重叠的情况来分别讨论。对空腔在底片上造成的 D 如式(4)所示。

异质夹杂物在底片同一部位造成的 D :

$$D_{\text{杂}} = -0.434 \mu x \quad (6)$$

将(4)、(6)两式合并, 即照工件中含有异质夹杂物时的 D :

$$D_{\text{异}} = -0.434 x \mu \quad (7)$$

式中, $\mu = \mu_{\text{杂}} - \mu$ 。(7)式适用于厚 x 的局部疏松情况。贯穿全厚度的疏松为(5)式。我们常用国产天津型 X 光胶片, 选用硫酸钡屏(医用 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ 屏), 当 D 在 2 与 4 之间时, 的平均值为 2.89。随 D 值增高, 值增高。因此, 在观片光线亮度允许的条件下, 尽量提高 D 值, 可获得较高的值或 D 值, 这点与 X 光照相相同。中子照相与 X 光照相不同点如下。

(1) X 光照相的 μ 值是变量, 其值随管电压值升高而降低, 在被照工件不太厚情况下, 随工件厚度增加, 由于滤波效应, 有效波长 λ_{eff} 变短, μ 值降低。而中子照相无此问题, 只是在被照工件特别厚情况下, 如 Fe 在 70 mm 以上时, 热中子变冷, μ 值降低, 热中子照相的曝光曲线($x-t$ 曲线)开始弯曲。

(2) 中子照相多数情况下在被照工件中加标记元素 Gd(GdO 粉)。而 Gd 元素只强烈吸收热中子而无散射。一般中子照相被照工件均不太厚, 因此在 D 表达式中没有散射因素($n+1$)项, 因为 Gd 不但自己不散射, 还要强烈吸收散射线。

1.2 中子照相底片总不清晰度 U_T 的估算

中子照相 U_T 常用 Klasesn 法测量:

(1) 对具有齐锐边缘的镅片刀口进行中子照相;

— 48 —

(2) 显微光度计对刀口处底片作黑度扫描, 得出黑度 D 随距离 x 变化的曲线;

(3) 曲线黑度值上限 D_2 、下限 D_1 , 取曲线除去上下限各高为 $0.16(D_2 - D_1)$ 部分, 定义其在 x 轴上宽度为 U_T 。

估算 U_T 有经验公式^[2]:

$$U_T = (U_G^3 + U_{\text{FF}}^3)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中 U_G 为中子照相系统的几何不清晰度:

$$U_G = \frac{xd}{L}$$

x 为工件厚度, d 为中子源通道入口直径, L 为自 d 至屏距离; U_{FF} 为屏胶片系统固有不清晰度。因此, 适当增加 $\frac{L}{d}$ 比值, U_G 即可减小。一般实用的 $\frac{L}{d}$ 比值在 70~200 之间, U_G 值在 $10 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 间。 U_{FF} 取决于转换屏受中子辐照时发出二次射线在胶片中的射程。象 Gd 屏, 其发射出的二次射线为 70 keV 的内转换电子, 在乳胶中射程为 $20 \mu\text{m}$ (以上我们讨论的是胶片与转换屏贴的情况下)。如胶片与屏贴不紧, 有间隙 S , U_T 值则大大增加, 因为由间隙 S 引起的 U_{FF} 会大大增加, 这是因为 Gd 俘获热中子发出 70 keV 内转换电子, 在屏胶片贴紧时, 在乳胶中只有 $20 \mu\text{m}$ 射程, 即使按水平辐射, U_{FF} 极大值也只有 $20 \mu\text{m}$; 而当屏片之间有了间隙 S 后, 70 keV 的电子由屏先入空隙中各向斜穿行, 由于能量低, 不能使空气电离而失去能量, 因而在空气中射程近于 ; 因此间隙 S 对 U_{FF} 的影响要远大于 U_G , 这一点类似 X 光照相中荧光增感屏应用, 一定要贴紧屏片。为此, 国外多采用专用压紧的暗盒, 甚至采用抽真空的暗盒。

2 中子照相 D 估算的几个例举

国外中子照相应用方面早期报道的有火工品导爆索中子照相, 导爆索是由铅皮或银皮包覆的火药构成。如在制造工序中, 在火药中混入铅或银粒, 则会引起阻燃, 影响导爆索使用。为提高中子照相反差, 常在火药中加入百分之几的 GdO 作指示剂。如在火药中加 3% GdO, 由火药引起的衰减增加与由氧引起 Gd 含量微小减少相抵, 则对直径为 0.2 mm 的铅粒产生的 D :

$$D_{\text{铅}} = -0.434 x \mu + 0.434 \times 2.89 \times 0.02 \left[\left(\frac{3}{100} \times 497 \right) - 0.39 \right]$$

宇航材料工艺 2002 年 第 6 期

0.45

因为 $\mu = \mu_{\text{杂}} - \mu$, $\mu_{\text{杂}}$ 是铅, 为 0.39cm^{-1} ; μ_{Gd} 为 497。D 为正值, 意为 D 是黑度增加的黑点状影像。如包皮为银, 则 0.2 mm 的银粒 D:

$$D_{\text{银}} = +0.434 \times 2.89 \times 0.02 \left[\left(\frac{3}{100} \times 497 \right) - 2.5 \right]$$

0.19

肉眼无法分辨的点状影像。

用中子照相检测飞机涡轮空芯残留的陶瓷型芯, 也用在陶瓷掺 GdO 粉的方法。残芯在底片上的影像 D 相当一个负 x 的“洞”:

$$D_{\text{瓷}} = -0.434 \mu_{\text{瓷}} x$$

如残芯 x 为 0.2 mm, 则 $D_{\text{瓷}}$:

$$D_{\text{瓷}} = -0.434 \times 2.89 \times 0.02 \left(\frac{3}{100} \times 497 \right)$$

0.36

负的 D 意为一个淡亮些的点。

3 目前国内中子照相状况

自 1978 年我们与中国原子能研究院物理所在国内首次进行中子照相实验, 并在当年第一届全国 NDT 年会大会发表论文“中子照相实验”以来, 清华大学工程物理系、东北师范大学物理系等单位也先后开始了中子照相研究工作。1980 年我们粗测过金属透度计相对灵敏度 (Fe) 可达 2.2%, 用 Gd_2O_3 S 屏配用天津 V 型 X 光胶片能获得 $40\ \mu\text{m} \sim 20\ \mu\text{m}$ 的

分辨率。清华大学 20 世纪 90 年代用 ASTM E545 标准像质计测定, 可达到高级标准^[3]。东北师范大学中子管倍增中子源研究工作也取得了很大进展, 已向中子源轻便实用化前进了一大步。最近, 清华大学应用贮光材料转换屏进行中子照相, 可以在积分通量 $10^4 \sim 10^5$ 条件下成像。

4 结束语

从前面的例举中可以看出, 由于银的线衰减系数 ($2.5\ \text{cm}^{-1}$) 高于铅的 ($0.39\ \text{cm}^{-1}$), 银包皮导爆索的中子照相 μ 项要小于铅的, 故银粒夹杂物的成像反差 D 低, 这一情况在国内外早期中子照像中均有过报道。从公式中可以得知: 欲提高反差 D, 一是要选用 μ 值高的胶片转换屏系统; 二是在工艺允许的条件下, 提高指示剂 GdO 的含量, 借以提高 μ 值, 加多少指示剂可以满足灵敏度需要, 可以用公式估算。

参考文献

- 1 米斯 C E K. 照相过程理论. 上册, 科学出版社, 1986: 234 ~ 236
- 2 Robertson T. 18 Neutron radiography in the precision measurement of irradiated materials. Neutron Radiography Service AERE Harvell, 1980: 107
- 3 汤明. 热中子照相及其质量控制. 宇航材料工艺, 1994; (4): 42 ~ 43

(编辑 李洪泉)

无公害精炼剂、变质剂在铸造铝合金上的应用

一些单位使用六氯乙烷、氟硅酸钠、氟化钠、氯化钠、氯化钾等可产生有毒气体的原料作铝合金熔炼剂, 虽然熔炼效果较好, 但对环境污染严重, 并严重危害人体健康, 而且工艺复杂, 熔炼成本高。

本成果研制出无公害精炼变质铸铝工艺, 完全不使用含氯和氟的化学原料, 熔炼前不需对精炼剂、变质剂进行脱水处理, 精炼变质过程反应平稳, 扒渣方便, 铝合金熔液不粘熔炼工具和坩埚, 变质延续时间长。炼出来铝合金产品, 晶粒细小, 化学成分稳定, 炉前断口气孔率稳定在 1 ~ 2 级, 力学性能好。无公害铝合金熔炼技术达到先进水平。

· 李连清 ·