

# 第八讲 中子射线照相检验技术

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

## NEUTRON RADIOGRAPHY

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

### 1 概述

1920年,英国著名物理学家卢瑟福提出,可能存在一种质量大体与质子相等的中性基本粒子。整个20年代,开文迪许实验室在卢瑟福的领导下,进行了大量寻找这种中性粒子的实验研究。1930年,德国物理学家波特(W. Bothe)和贝开尔(H. Becker)利用天然放射性元素发射的 $\alpha$ 粒子轰击铍、锂等时,发现了一种穿透力很强的辐射,他们认为这种辐射就是 $\gamma$ 射线。许多人研究了这种辐射,发现把这种辐射认为是 $\gamma$ 射线将出现不符合能量守恒定律的情况,并且测得在铅中的吸收系数只有 $0.22\text{cm}^{-1}$ ,这个值远小于 $\gamma$ 射线在铅中的吸收系数 $0.46\text{cm}^{-1}$ 。多年研究中子问题的J. 查德威克进一步研究了这种辐射,发现这种辐射的电荷很小,可能为0,其质量与质子相近,命名其为中子。中子的发现是人类认识物质微观结构的重要里程碑。自由中子是不稳定的,存在的时间仅为 $10^{-9}\sim 10^{-6}\text{s}$ ,按 $\beta$ 衰变理论估计,自由中子的半衰期约为 $10.60\text{min}$ 。

早在1946年就有人利用小型加速器中子源研究中子射线照相技术。由于中子强度太弱,没有实用意义,直到1955年,英国J. Thewlis在Harwell中心利用BEPO反应堆,才成功地进行了第一次中子射线照相。60年代中期,由于放射性物质检验的需要,中子射线照相技术得到迅速的发展和应用。目前,在中子射线照相技术中广泛应用的是热中子射线照相技术,这主要是因为:

- (1) 不同元素或同位素的热中子质量吸收系数差异最大。
- (2) 热中子的检测比较容易。
- (3) 容易得到足够强度的热中子源。

与常规X和 $\gamma$ 射线照相技术相比,中子射线照相技术的特点是:

- (1) 可以检验金属中的某些低原子序数物质。
- (2) 可以对放射性物质进行检验。
- (3) 可以区分同一元素的不同同位素。

中子射线照相技术的主要缺点是中子源价格昂贵,使用时需特别注意中子的安全与防护问题,这限制了中子射线照相技术的应用。中子射线照相技术是常规X和 $\gamma$ 射线照相技术的补充,对一些特殊问题、特殊领域,如核工业,中子射线照相技术具有特殊的意义。

### 2 中子与物质的相互作用

中子是基本粒子之一,在本质上它与X射线和 $\gamma$ 射线不同。X射线、 $\gamma$ 射线和物质的相互作用,是它们的光量子与物质原子的电子或原子核的相互作用。中子与物质的相互作用是它与物质原子的原子核通过核力的相互作用,中子与电子之间通过磁相互作用,但这种作用远小于中子与原子核的相互作用。中子与原子核间的作用,决定了中子与物质的相互作用。

中子与原子核的作用机制主要包括势散射、复合核和直接作用等。势散射是中子接近原子核时,受到核力场的作用而被散射。中子的部分动能传给原子核,中子改变能量和运动方向,原子核发生反冲。在散射前后中子与原子核系统的动能和动量守恒。复合核是中子被原子核吸收形成复合核,入射中子的动能一部分转化为复合核的动能,其余部分及中子的结合能转化为复合核的激发能。复合核存在的时间很短,约为 $10^{-20}\sim 10^{-16}\text{s}$ ,但中子穿越原子核仅需 $10^{-22}\text{s}$ ,所以,可以认为复合核存在相当长的时

间。复合核可以以不同的方式衰变。直接作用是入射中子与原子核内少数粒子直接发生相互作用, 不经过任何中间态的核反应。概括起来, 中子与原子核的相互作用主要包括弹性散射、非弹性散射、辐射俘获及其它核反应。

弹性散射又称为 (n, n) 反应, 它包括势散射和复合核散射。在这个作用过程中, 中子与原子核发生能量转移, 但整个体系的动能和动量保持守恒。对中能中子, 弹性散射是中子能量损失的主要作用过程。

在非弹性散射中, 入射中子的部分动能转化为原子核的激发能, 核处于激发态, 通过发射一个或多个光子释放激发能回到基态。在每次相互作用中, 中子损失的能量很小。

非弹性散射只有在中子能量高于靶核的第一激发能级时才能发生。重核的第一激发能级约在基态以上 100keV, 轻核的第一激发能级在基态以上约 3 ~ 4MeV, 因此, 快中子与重核相互作用时, 非弹性散射占优势。但经过几次非弹性散射后, 中子能量降到第一激发能级以下, 此后, 将主要发生弹性散射作用过程。

入射中子与原子核形成激发态的复合核, 中子被吸收, 复合核通过发射  $\gamma$  光子回到基态, 不发射其他粒子, 这种相互作用过程称为辐射俘获。这个过程也称为 (n,  $\gamma$ ) 反应。任何能量的中子几乎都能与靶核发生辐射俘获, 反应截面仅与中子能量相关。反应后粒子内多了一个中子, 因此, 其一般是放射性的。各种核素的热中子俘获截面变化很大, 如元素  $^{135}\text{Xe}$  为  $2.65 \times 10^{-22} \text{m}^2$ , 元素  $^{18}\text{O}$  为  $10^{-32} \text{m}^2$ 。

除了上述作用过程外, 不同能量的中子与原子核还可能发生其他核反应。主要有发射带电粒子的核反应、裂变反应和多粒子发射等。在发射带电粒子的核反应中, 复合核通过发射带电粒子, 如  $\alpha$  粒子、质子等而发生衰变。在裂变反应中, 重核俘获一个中子后分裂为两个较轻的原子核, 并放出 2~ 3 个中子及 20MeV 的巨大能量。发生这种核反应的条件是复合核的激发能应高于裂变势垒能量。当入射中子的能量足够高时 (大于中子结合能 8~ 10MeV 时), 可以发生复合核发射两个或多个粒子的核反应, 如 (n, 2n)、(n, np) 等多粒子发射过程。

由于这些作用, 造成中子的散射和吸收。

中子按能量常分为冷中子、热中子、慢中子、快中子和相对论中子等。不同能量的中子其主要作用过程不同, 表 8-1 列出了不同能量中子的主要作用。

中子透射物体时, 部分中子被吸收, 部分中子被散射, 透射的中子束强度被减弱, 强度的衰减与 X,  $\gamma$

表 8-1 中子分类与主要作用

中子分类	中子能量	主要作用过程
冷中子	$< 0.01\text{eV}$ 或 $< 1.6 \times 10^{-21}\text{J}$	
热中子	$0.01 \sim 0.5\text{eV}$ 或 $1.6 \times 10^{-21} \sim 8.0 \times 10^{-20}\text{J}$	辐射俘获
慢中子	$0.5\text{eV} \sim 10\text{keV}$ 或 $8.0 \times 10^{-20} \sim 1.6 \times 10^{-15}\text{J}$	弹性散射, 辐射俘获
快中子	$10\text{keV} \sim 2.0\text{MeV}$ 或 $1.6 \times 10^{-15} \sim 3.2 \times 10^{-12}\text{J}$	弹性散射
相对论中子	$> 2.0\text{MeV}$ 或 $> 3.2 \times 10^{-12}\text{J}$	弹性散射, 非弹性散射

射线服从同一规律——指数衰减规律, 即

$$I = I_0 e^{-\mu_n x}$$

式中  $I$ ——透射中子强度  
 $I_0$ ——入射中子强度  
 $\mu_n$ ——物质的中子线衰减系数  
 $x$ ——物体厚度

### 3 中子射线照相技术

#### 3.1 中子射线照相技术原理

中子射线照相的基本透照布置如图 8-1 所示。从中子源发出的中子束, 通过准直器照射到被检工件, 检测器记录透射的中子束分布图象。不同物质具有不同的中子衰减系数, 因此透射中子束的分布图象可以形成工件缺陷和杂质等的图象。

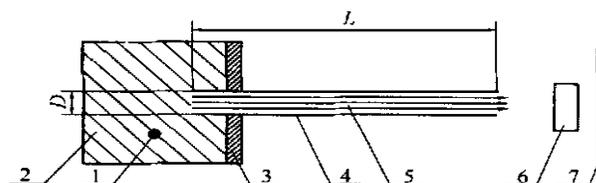


图 8-1 中子射线照相的基本透照布置

- 1. 快中子源 2. 减速剂 3. 中子吸收层
- 4. 准直器 5. 中子束 6. 工件 7. 胶片
- D——中子入射孔径 L——准直器长度

图 8-2 是不同物质对热中子的质量吸收系数。从图中可见, 中子的质量吸收系数随原子序数的变化完全不同于 X 射线和  $\gamma$  射线那种连续变化的规律性, 它除了相关于中子的能量外, 与物质的原子序数不存在简单的相关关系, 没有明显的规律性。例如, 氢、硼、锂等轻元素和一些稀土元素等对中子的质量吸收系数很大, 而一些重元素的质量吸收系数却很小, 同一元素的不同同位素的质量吸收系数也不同。产生这种差异的原因是中子主要通过核力与

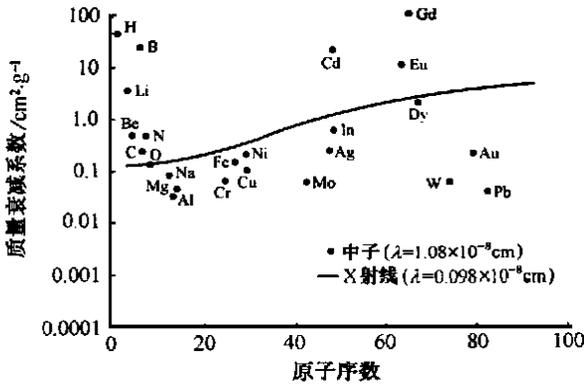


图 8-2 热中子质量衰减系数

原子核相互作用。正是由于这种特点, 产生了中子射线照相不同于 X 射线和  $\gamma$  射线的一些特点。

### 3.2 热中子源

用质子、氘核、 $\alpha$  粒子、其它带电粒子和  $\gamma$  射线轰击原子核, 都可以产生中子。核的裂变过程或原子核的衰变过程也可以产生中子。按中子产生的方法中子源可分为四类, 即同位素中子源、加速器中子源、反应堆中子源和亚临界装置。同位素中子源利用天然放射性物质放出的粒子或  $\gamma$  射线轰击靶物质, 或者放射性物质的自发裂变过程产生中子。加速器中子源利用加速器加速带电粒子, 在带电粒子达到较高能量时轰击靶核, 引起发射中子的核反应。反应堆中子源利用中子引起重核裂变, 裂变过程放出更多中子, 即通过可控制链式反应产生中子。

描述中子源的主要指标是强度、能谱和角分布。强度是中子源单位时间发射的中子数, 能谱是发射中子的能量, 常记为  $E_0$ 。角分布是中子源强度随发射角的分布。表 8-2 列出了四类中子源的典型特性, 表 8-3 列出了部分同位素中子源的特性。

中子射线照相所用的热中子是由快中子减速产生的。

当快中子进入物体后, 由于与物质原子核发生弹性散射和非弹性散射, 造成能量损失而被减速。非弹性散射只发生在减速过程开始, 减速主要由弹性散射过程实现, 通过减速使快中子慢化。快中子慢化采用减速剂实现, 通过减速使中子的平均能量达到

表 8-2 中子源特性比较

中子源类型	源强度 $n/cm^2 \cdot s$	能谱	空间分辨率	曝光时间
同位素中子源	$10 \sim 10^4$	多能, 快中子	中	长
加速器中子源	$10^3 \sim 10^6$	单能, 快中子	中	中
反应堆中子源	$10^5 \sim 10^8$	连续, 快中子	高	短
亚临界装置	$10^4 \sim 10^6$	—	较高	中

表 8-3 同位素中子源特性

中子源	反应方式	半衰期	中子平均能量/M eV	中子产额 $n/g \cdot s$
$^{238}\text{Pu} - \text{Be}$	$(\alpha, n)$	89a	4	$4.7 \times 10^7$
$^{241}\text{Am} - \text{Be}$	$(\alpha, n)$	458a	4	$1 \times 10^7$
$^{241}\text{Am} - ^{242}\text{Cm} - \text{Be}$	$(\alpha, n)$	163d	4	$1.2 \times 10^9$
$^{244}\text{Cm} - \text{Be}$	$(\alpha, n)$	18.1a	4	$2.4 \times 10^8$
$^{252}\text{Cf}$	自发裂变	2.65a	2.3	$3 \times 10^{12}$
$^{210}\text{Po} - \text{Be}$	$(\alpha, n)$	138d	4.3	$1.28 \times 10^{10}$
$^{124}\text{Sb} - \text{Be}$	$(\gamma, n)$	60d	0.024	$2.7 \times 10^9$

与减速剂原子核的平均动能相同。描述减速剂材料的主要参数是慢化能力和减速比。慢化能力是在减速剂的单位行程内中子能量的对数平均降低量。减速比是慢化能力与宏观吸收截面之比。选择减速剂材料时, 既要考虑它的慢化能力, 又要考虑它的减速比。慢化能力大而减速比小的材料, 由于宏观吸收截面大, 不适宜作减速剂材料。

表 8-4 列出了一些减速剂的减速特性。

表 8-4 减速剂的特性

减速剂	慢化能力/ $\text{cm}^{-1}$	减速比
水与其它含氢物质	1.53	60
重水	0.18	6000~20000
铍	0.16	135
石墨	0.063	175

减速以后从中子源引出的热中子必须经过准直, 形成分布均匀的中子束, 才能作为中子射线照相的中子源, 在中子射线照相时, 为了得到图象, 到达检测器的中子束需要达到下述强度:

一般质量图象:  $10^5 n/cm^2$  (快速胶片);

较高质量图象:  $10^9 n/cm^2$  (慢速胶片);

实时图象:  $10^5 \sim 10^7 n/cm^2$ 。

### 3.3 中子射线照相几何不清晰度

按图 8-1, 通过选择准直比  $L/D$ , 控制中子射线照相的几何不清晰度。几何不清晰度为

$$U_g = \frac{D}{L} T$$

在实际中子射线照相中, 准直比  $L/D$  一般选为

一般工件:  $L/D > 10$ ;

薄工件:  $L/D = 50 \sim 500$ 。

### 3.4 中子射线照相转换屏

中子不能直接引起物质电离, 对中子的检测是通过中子与原子核作用产生的带电粒子或  $\gamma$  射线检测实现的。在热中子射线照相中, 由于中子本身几

乎不能使胶片感光, 因此必须采用转换屏。转换屏在中子的照射下可以发射  $\alpha$ 、 $\beta$  或  $\gamma$  射线, 利用这些射线使胶片感光, 记录透射中子分布图象, 完成中子射线照相。

转换屏分为两类, 一类是钷、锂、硼、镉等, 它们在中子照射下瞬时发射射线; 另一类是铷、铯、铊等, 它们受到中子照射时, 可以俘获中子, 形成具有一定寿命的放射性核, 在以后的放射性衰变中放射出  $\gamma$  射线。表 8-5 给出了热中子射线照相常用的转换屏性能。

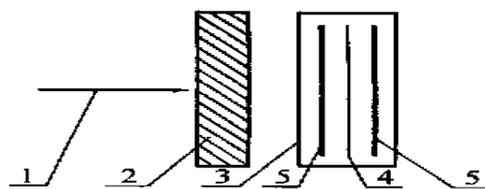
表 8-5 热中子射线照相的转换屏

转换屏	热中子截面 $\times 10^{-26} \text{m}^2$	半衰期	发射 粒子	发射粒子的最大 能量/M eV
钷	9.35	瞬时	$\alpha$	4.7
硼	38.37	瞬时	$\alpha$	2.3
镉	200	瞬时	$\gamma$	9
钷	580	瞬时	e	0.14
钷	2.400	瞬时	e	0.13
钷	415	瞬时	$\gamma$	-
铷	1.44	43s	$\gamma$	2.41
铯	1.44	57m in	X	0.02
铯	0.11	4.4m in	$\gamma$	0.5
铯	0.45	14s	$\beta$	3.3
铯	1.54	54m in	$\beta$	0.42
铯	8	2.35h	$\beta$	1.29, 0.095
铯	20	1.26m in	$\beta$	1.04, 1.108
铯	2.1	46.7h	$\beta$	0.8, 0.1
铯	0.44	2.4m in	$\beta$	1.64, 0.48
铯	1.10	24.5s	$\beta$	2.87
铯	0.03	254d	$\beta$	1.5, 0.66
铯	0.988	2.69d	$\beta$	0.412

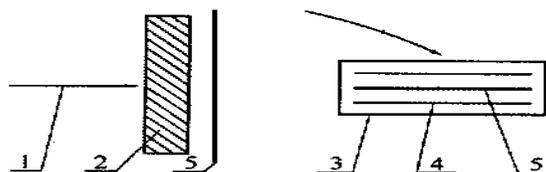
### 3.5 中子射线照相方法

按照选用的转换屏可把中子射线照相分为两种方法, 即直接曝光法, 选用第一类转换屏(瞬时屏)(图 8-3a); 间接曝光法, 选用第二类转换屏(活化屏)(图 8-3b)。

在直接曝光法中, 胶片与转换屏同时装入暗盒置于中子束中进行透照, 胶片直接记录转换屏在中子照射下所产生的瞬时图象。直接曝光法可以在低通量下进行长时间曝光, 完成射线照相。直接曝光法的缺点是胶片同时将受到从工件及周围物体产生的  $\gamma$  射线的照射, 导致图象质量降低。直接曝光法应正确选取转换屏, 经常使用的转换屏是钷转换屏。



(a) 直接曝光法



(b) 间接曝光法

图 8-3 中子射线照相方法

1. 中子束 2. 工件 3. 暗盒 4. 胶片 5. 转换屏

在间接曝光法中, 首先是工件与转换屏在中子束下进行透照, 在转换屏中形成工件的放射性影象; 透照后, 将转换屏移至暗盒中, 置于胶片之上使胶片感光, 形成工件的射线照相影象。由于在转换屏中放射性活度的积累服从指数规律, 因此, 在长时间中子照射下, 转换屏的放射性活度将趋于饱和。所以, 间接曝光法应正确选取曝光时间。间接曝光法经常使用的转换屏是铷转换屏和铯转换屏。这种方法的优点是适合于放射性物体的射线照相。

除了转换屏, 也可以采用闪烁体与胶片组合进行中子射线照相, 常用的闪烁体是钷、硼和硫化铯等。这时可在曝光量为  $10^5 \sim 10^6 \text{n/cm}^2$  下获得热中子射线照相图象, 图象的空间分辨力可达  $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

### 4 中子射线实时成象技术

热中子射线照相也可以构成中子射线实时成象系统, 系统由中子源、闪烁体、图象增强器、摄像机、图象处理器和显示器组成。在系统中实现下面的成象过程:



在中子强度达到  $10^5 \sim 10^7 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$  时, 系统的空间分辨力可达  $0.25 \sim 0.5 \text{mm}$ , 可以跟踪移动速度达  $3 \text{m/min}$  的检测。

### 5 其它能量中子的射线照相技术

除了热中子, 也可以采用其它能量中子进行射

线照相。用于热中子的射线照相技术, 通常同样可用于其它能量中子的射线照相。但不同能量中子的射线照相有其独特的特点, 技术上关键的问题是选取适当的中子源和适当的中子检测方法。

例如, 冷中子对于多数物质其中子截面增大, 但对铁、硅、石墨等多晶物质, 由于散射截面大大减小, 所以可看成是透明的, 利用这个特点可以采用冷中子检查这些物质中的杂质。对共振中子, 由于共振中子与物质作用具有共振特性, 因此, 适当选择共振中子能量可以更好地区别某些物质。如钽和钨, 它们的热中子截面相近, 但中子能量为  $4.2 \sim 4.5\text{eV}$  时, 钨的截面  $< 10^{-26}\text{m}^2$ ; 钽的截面  $> 10^{-25}\text{m}^2$ ; 中子能量为  $7.4\text{eV}$  时, 钨的截面  $3 \times 10^{-26}\text{m}^2$ , 钽的截面  $< 1.1 \times 10^{-27}\text{m}^2$ 。

可见, 利用这些能量的中子, 可以很好地区分钽和钨。

## 6 中子射线照相技术的应用

### 6.1 应用概况

从 60 年代中期以后, 中子射线照相技术以本身具有的特点, 作为与常规 X、 $\gamma$  射线照相技术互相补充的射线照相技术进入了工业应用。

中子射线照相主要应用于下面几个方面:

- (1) 高密度材料检测, 如铅、铋、铀等。
- (2) 高密度材料中的低原子序数物质检测。
- (3) 放射性材料检测。
- (4) 同位素区分和原子量相近元素区分等。
- (5) 生物医学应用。

下面是一些典型应用例子。

### 6.2 应用实例

#### 6.2.1 金属外壳中含氢物质的检测

(上接第 354 页)

$$L_{\text{eff}} = \widehat{L}_3 + 2L_2 \text{tg} \theta = 483 + 2 \times 20 \times \text{tg} 6^\circ = 487\text{mm}$$

## 4 结论

(1) 由式(1), (2)求得环缝偏心内照法的射线束半辐射角  $\eta_{\text{min}} = 24.62^\circ (K = 1.1)$  和  $\eta_{\text{min}} = 19.37^\circ (K = 1.06)$ 。用  $\eta = 20^\circ$  的定向 X 射线机对环缝偏心内照时, 不能用式(1), (2)计算探伤工艺参数。式(1), (2)只适用于周向机对环缝偏心内照时的计算。

(2) 用  $\eta = 20^\circ$  的定向 X 射线机对环缝内照, 应采用式(3)~(5)计算 100% 透检时的  $N$ ,  $\widehat{L}_3$  和  $L_{\text{eff}}$  参

例如, 空心叶片型芯残留物、子弹装药情况, 固体火箭推进剂装填情况以及焊锡丝中助焊剂情况等, 这些问题用 X 射线或  $\gamma$  射线是难以检查的, 但用中子射线照相却是很容易的。主要是因为其内部的物质都含有大量的氢元素, 它对中子的吸收远高于金属外壳。图 8-4 是锡焊料的中子射线照相结果, 图中清晰显示了松香芯中的气孔。

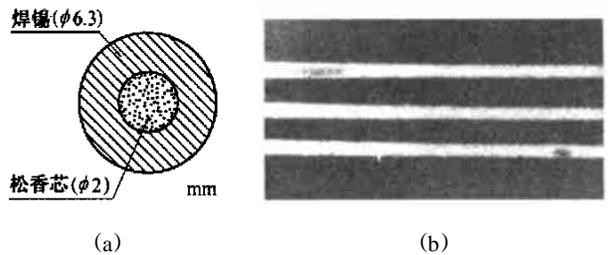


图 8-4 锡焊料的中子射线照片

#### 6.2.2 金属粘结质量与表面腐蚀检测

例如铝蜂窝粘结结构表面蒙皮与蜂窝芯体的粘结情况, 由于粘结剂强烈吸收中子, 因此采用中子射线照相能够很容易检查粘结质量, 而这对于 X 射线和  $\gamma$  射线可能是困难的。类似的情况是, 金属表面的腐蚀裂纹, 由于裂纹中常常含有水分、油类等富氢物质, 采用中子射线照相也很容易检查。

#### 6.2.3 核燃料检测

由于核燃料具有放射性, 因此可采用中子射线照相的间接曝光法来实现核燃料的内部结构和尺寸的射线照相检测, 而用其它射线照相方法却是困难的。核燃料的尺寸测定可以采用热中子射线照相和  $0.25\text{mm}$  厚的镅转换屏间接曝光法, 尺寸测量精度可达  $0.038\text{mm}$ 。

收稿日期: 2000-01-10

数, 此时的计算结果, 达到国标透照质量等级 B 级的要求。

(3) 要减小透照次数, 提高透照效率, 用  $\eta = 20^\circ$  的定向 X 射线机对环缝偏心内照时, 无论是  $f > R$  或  $f < R$ , 都可采用增大焦距  $f$  的办法来达到目的。

## 参 考 文 献

- 1 胡天明 射线探伤 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994 172- 180
- 2 全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会编写 射线探伤 北京: 中国劳动出版社, 1989 102- 106

收稿日期: 1999-08-31