

# γ反散射测量特殊涂层厚度的补偿问题

上海工业自动化仪表研究所

洪炳隆

在我们接受的一项任务中,要求测量在20毫米厚的玻璃板上所涂的一层特殊涂层厚度。涂层材料的重度 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 左右,玻璃钢的重度 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 左右。根据这个具体测量对象,采用 $A_{n^{241}}$ 的低能γ射线作为辐射源。玻璃钢对这种射线有较强的反散射作用。在使用这种辐射源的情况下对20毫米厚的玻璃钢基板进行测试,已经接近于饱和反散射的厚度了。在它上面涂层的厚度增加时,反散射穿透涂层时因被涂层材料吸收而衰减。

图1 是实验装置的示意图

图2 是用FH—421单道所作的能谱。

图中曲线1是没有板的情况,4是仅有玻璃钢没有涂层情况,2是在玻璃钢基板上涂有1.46毫米厚的涂层,3是涂有0.5毫米厚涂层的情况。

由于要求测量涂层厚度的范围大,随着涂层厚度的增加,由涂层材料对初始辐射的

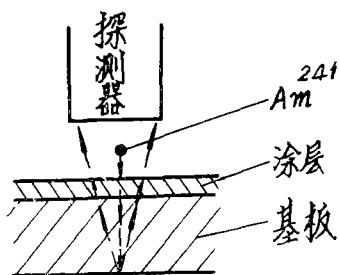


图 1

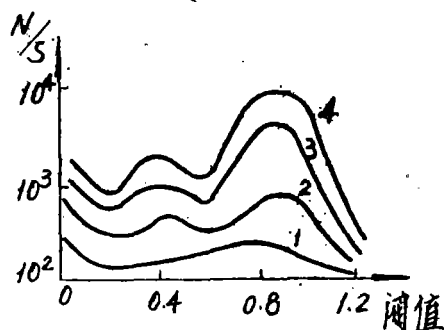


图 2

反散射作用就不能忽略了。因此,在测量比较厚的涂层时,就不是简单的反散射或者是吸收规律了。

在这种情况下,探测器所接收到的应该是怎样的规律呢?可以先假设两种情况:第一种,探测器接收到的仅仅是涂层材料的反散射部分,如图3所示;第二种是基板B的反散射部分穿透涂层材料后进入探测器(图4)。实际上探测器收到的是两部分反散射的和。

为了计算方便,先假设是第一种情况。根据反散射的公式可以得到:

$$J_A(d) = \frac{\mu_{康A} J_0}{\mu_{初A} + \mu_{散A}} \times [1 - e^{-(\mu_{初A} + \mu_{散A}) \mu d}] \dots (1)$$

其中 $\mu_{康A}$ —涂层A的初始辐射康普顿衰减系数

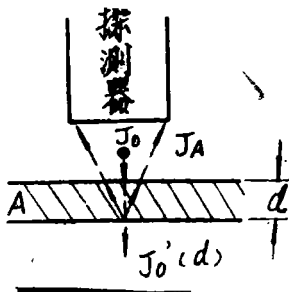


图 3

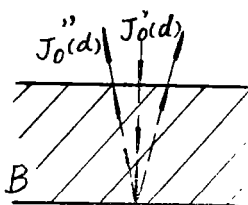


图 4

$$J_0'(d) = J_0 e^{-\mu_{初A} d}$$

由于玻璃钢基板B已经接近于饱和反散射厚度，玻璃钢对于辐射强度为 $J_0'(d)$ 的射线的反散射，由(1)可以得到，这时由玻璃钢反散射的强度 $J_0''(d)$ ：

$$J(d) = \frac{\mu_{康A} J_0}{\mu_{初A} + \mu_{散A}} [1 - e^{-(\mu_{初A} + \mu_{散A})d}] + \frac{\mu_{康B} J_0}{\mu_{初B} + \mu_{散B}} e^{-(\mu_{初A} + \mu'')d}$$

..... (3)

入射的 $\gamma$ 射线的能量是60keV，反散射的能量是48.6keV，近似地认为 $\mu_{初A} = \mu''_A$   
 $\mu_{初A} + \mu_{散A} = \mu_{初A} + \mu''_A = \mu_0$ 。(3)式简化为：

$$J(d) = \frac{\mu_{康J_0}}{\mu_{初A} + \mu_{散A}} (1 - e^{-\mu d}) + \frac{\mu_{康B} J_0}{\mu_{初B} + \mu_{散B}} e^{-\mu d} \quad (4)$$

$\mu_{初A}$ —  
 涂层A的初始  
 辐射全线性衰  
 减系数

$\mu_{散A}$ —  
 散射辐射在涂  
 层A内的全  
 线性衰减系  
 数

第二种情  
 况，初始辐射  
 穿透涂层A，  
 进入玻璃钢的  
 辐射强度应该  
 服从吸收规  
 律：

$$J_0''(d) = \frac{\mu_{康B}}{\mu_{初B} + \mu_{散B}} J_0'(d) \\ = \frac{\mu_{康B} J_0}{\mu_{初B} + \mu_{散B}} e^{-\mu_{初} d}$$

其中

$\mu_{康B}$ —玻璃钢的 $J_0'(d)$ 康普顿衰减系数

$\mu_{初B}$ —玻璃钢的 $J_0'(d)$ 全线性衰减系数

$\mu_{散B}$ —散射辐射在玻璃钢内的全线性  
 衰减系数

$J_0$ —初始辐射强度。

辐射强度为 $J_0'(d)$ 的射线穿透涂层A后，  
 为探测器所接收到的应该服从吸收规律即：

$$J_B(d) = J_0''(d) e^{-\mu''_A d}$$

将 $J_0''(d)$ 代入上式即得：

$$J_B(d) = \frac{\mu_{康B} J_0}{\mu_{初B} + \mu_{散B}} \\ \times e^{-(\mu_{初A} + \mu''_A)d} \quad (2)$$

其中： $\mu''_A$ 是 $J_0''(d)$ 在涂层A的线性衰减系  
 数

实际上被测量到的辐射强度应该是  
 $J_A(d)$ 、 $J_B(d)$ 之和：

$$J(d) = J_A(d) + J_B(d)$$

将(1)、(2)式代入上式：

(4) 式就是测量比较厚的涂层材料应该服从的规律。这个公式仅仅是通过简化计算而得到的式子, 是否符合实际测量情况, 还得通过实际来验证。由于材料的组成成份不知

道, 所以只能通过实验方法计算出  $\mu = 7.862 \text{C}_m^{-1}$ 。将厚度值代入(4)式, 表 1 是  $J_A(d)$  项值, 表 2 是  $J_B(d)$  项值, 表 3 是  $J(d) = J_A(d) + J_B(d)$  项值。表 4 是实际测量值。

| 表 1 $J_A(d)$ 之值 |   |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d (mm)          | 0 | 0.2  | 0.5   | 1.0   | 1.5   | 2.22  | 2.48  | 3.08  | 4.16  | 5.06  |
| 计数率<br>N/S(次/秒) | 0 | 84.4 | 188.5 | 315.5 | 401.6 | 478.7 | 483.7 | 528.5 | 557.9 | 569.5 |

| 表 2 $J_B(d)$ 之值 |      |      |        |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| d (mm)          | 0    | 0.2  | 0.5    | 1.0  | 1.5  | 2.22 | 2.48 | 3.08 | 4.16 | 5.06 |
| 计数率<br>N/S(次/秒) | 9000 | 7890 | 6074.6 | 4100 | 2767 | 1571 | 1500 | 799  | 343  | 169  |

| 表 3 $J(d) = J_A(d) + J_B(d)$ |      |      |        |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| d (mm)                       | 0    | 0.2  | 0.5    | 1.0  | 1.5  | 2.22 | 2.48 | 3.08 | 4.16 | 5.06 |
| 计数率<br>N/S(次/秒)              | 9000 | 7774 | 6262.6 | 4415 | 3169 | 2050 | 1984 | 1328 | 900  | 736  |

| 表 4 实际测量值       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| d (mm)          | 0    | 0.2  | 0.5  | 1.0  | 1.5  | 2.22 | 2.48 | 3.08 | 4.16 | 5.06 |
| 计数率<br>N/S(次/秒) | 9096 | 8157 | 6363 | 3896 | 2901 | 1888 | 1706 | 1356 | 895  | 800  |

由表 3, 表 4 作曲线如图 6 所示。其中“×”表示按照(4)式计算值所作的曲线。“·”表示实际测量值所作的曲线。从图 6 中可以看到按照(4)式的计算曲线和实测曲线基本上是吻合的。也就是说(4)式是正确的。另外也可以看到, 当被测涂层厚度小于 1 毫米以下时, 主要是  $J_B(d)$  项起作用, 涂层材料的反散射部分是很小的, 可以忽略不计, 这时探测器接收到的信号是随厚度值增加而按指数衰减的。但是, 随着涂层厚度值增加, 涂层反散射部分的计数率也增加, 当它与第一项可以比较时, 就不能忽略。由于测量范围是 0~4 毫米涂层厚度, 因此, 必须考虑  $J_A(d)$  项的影响。

将(4)式进一步简化:

$$\mu d = H - \ln [J(d) - K] \quad (5)$$

其中:

$$K = \frac{\mu_{康A} J_0}{\mu_{初A} + \mu_{散A}}$$

$$H = \ln \left( \frac{\mu_{康B} J_0}{\mu_{初A} + \mu_{散A}} - \frac{\mu_{康A} J_0}{\mu_{初A} + \mu_{散A}} \right)$$

从(5)式中可以看到,在放射源选定、被测材料不变的情况下,K、H值都是常数。实际上H/ $\mu$ 值就是当涂层厚度为零时探测器所测量到的辐射强度,在仪器中通过调零可以实现。 $\ln [J(d)-K]$ 项通过简单的电路就可实现。图5就是实现这一项变换的电路原理图。图中 $V_J(d)$ 是对应厚度d时的积分电压, $V_K$ 是对应于K值的补偿电压,补偿电压值大小可以在调试中精确地选定。

后仪器的测量读数。

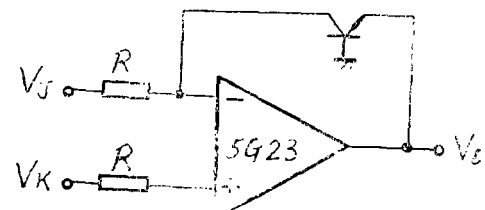


图 5

第一组 测量范围0~2毫米

$$V_K=0$$

|               |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 涂 层 厚 度 (mm)  | 0.19 | 0.39 | 0.52 | 0.64 | 1.03 | 1.30 | 1.59 |
| 读 数 (mm)      | 0.21 | 0.42 | 0.57 | 0.68 | 1.12 | 1.39 | 1.63 |
| $\Delta$ (mm) | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.04 | 0.09 | 0.09 | 0.04 |

$$\text{最大误差} \Delta/d = \frac{0.09}{1.03} = 0.087 = 8.7\%$$

$$V_K=0.52V$$

|               |      |      |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| 涂 层 厚 度 (mm)  | 0.19 | 0.39 | 0.52 | 0.64 | 1.30 | 1.59 |
| 读 数 (mm)      | 0.19 | 0.39 | 0.54 | 0.63 | 1.33 | 1.59 |
| $\Delta$ (mm) | 0    | 0    | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0    |

$$\text{最大误差} \Delta/d = \frac{0.02}{0.52} = 0.038 = 3.8\%$$

第二组测量范围: 2~4毫米

$$V_K=0$$

|               |      |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|------|
| 涂 层 厚 度 (mm)  | 1.95 | 2.13 | 2.89 | 3.34 | 4.87 |
| 读 数 (mm)      | 1.95 | 2.22 | 3.62 | 4.02 | 4.87 |
| $\Delta$ (mm) | 0    | 0.09 | 0.73 | 0.68 | 0    |

$$\text{最大误差} \Delta/d = \frac{0.73}{2.83} = 0.252 = 25.2\%$$

$$V_K = 0.55 V$$

|               |      |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|------|
| 涂 层 厚 度 (mm)  | 1.95 | 2.13 | 2.89 | 3.34 | 4.37 |
| 读 数 (mm)      | 1.95 | 2.09 | 2.91 | 3.33 | 4.37 |
| $\Delta$ (mm) | 0    | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0    |

$$\text{最大误差 } \Delta/d = \frac{0.04}{2.13} = 0.019 = 1.9\%$$

从上面两组数据比较中可知，采用图 5 如此简单线路是完全可行的，这样仪器容易维修，调试也简单。进行补偿之后，测量最大误差从 25% 下降到 1.9%，使得仪器在测量较厚涂层的情况下也能达到要求的测量精度。

从数据比较中还可以明显地看到，在厚度值小的情况下，补偿对读数影响小；涂层厚度增加，加不加补偿对仪器测量精度的影响就大。

### 参考资料

〔1〕 Radioisotopes Vol. 16 No. 5 P204 (1967)

〔2〕《利用放射性同位素的自动检查装置理论基础》舒米洛夫斯基、密里特采尔著，朱宝泉译

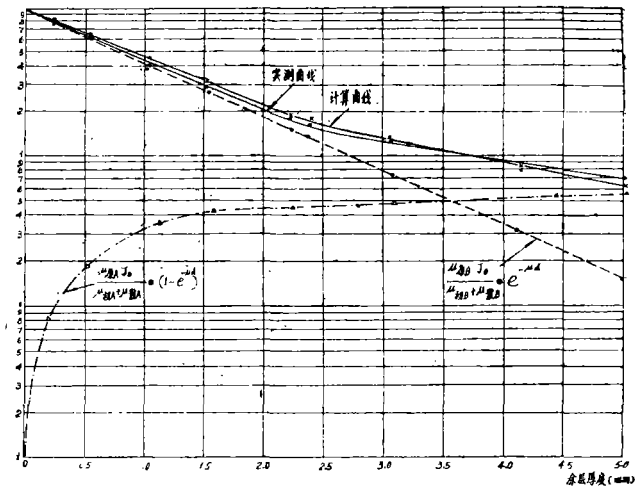


图 6

## 介绍一种新型工业用电化学电极

### ——固态参比电极

张友人 吴源陶

《自动化仪表》1980年第五期p.33~35

本文介绍了二机部五所研制的一种工业用电化学电极。该电极用于核原料加工处理工艺中效果良好,在化工、制碱、制药、造纸、冶金等工厂试用也证明其性能比甘汞电极更好。文中介绍了该固态参比电极的结构、特点、技术指标、应用及制作等。

## γ反散射测量特殊涂层厚度的补偿问题

### 洪炳隆

《自动化仪表》1980年第五期p.36~40

本文介绍了作者在完成测量20毫米厚的玻璃钢板上所涂的一层特殊涂层厚度的任务中,采用 $A_{m^{241}}$ 的低能γ射线作辐射源,通过简单的线路,解决了涂层材料的反散射补偿问题。整个测厚仪维修容易、调试也简单。补偿后,测量最大误差从25%下降到1.9%,测量精度也较高。

## 辐射高温计在盐浴炉上的应用

王 良

《自动化仪表》1980年第五期p.41~46

上海工具厂用辐射高温计控制盐浴炉温度已有20余年历史,工具淬火后的金相、硬度均能稳定地保持在较好水平,由于控温不当或感温器故障而造成过热报废的事故极为少见。作者在本文中介绍了辐射感温器的优点;合理安装、使用的常识和经验;使用和控温时的一些改进、革新;稳定性试验的数

据;盐浴黑度系数问题、盐雾干扰等问题的讨论和校温方法等等。

## 重新考虑检测流量用的弯管仪表

美国 E.G.Hauptmann

《自动化仪表》1980年第五期p.52~55

本文介绍了制造弯管仪表方面已有的改进,当选择流量计时,它们有被重新考虑的价值。文中就弯管仪表的工作原理、新型组件、典型特性和应用等问题作了简要说明。

张永江译自《Instruments & Control Systems》1978.51(10).p.47~50

## 关于罗茨流量计的压力损失

《自动化仪表》1980年第五期p.56~64

容积式流量计的压力损失与该流量计的仪表误差有密切关系,同时也与管道设计有关。若能预先判断其压力损失,设计就可合理化。本文即用不同容量的罗茨流量计,试验各种流体时的压力损失,从而导出压力损失与运动学粘度关系的经验公式。

林克努译自《流量计论文集》(トキコ株式会社)

## 固态电子学将在物位测量中占支配地位

亨利·M·英里斯

《自动化仪表》1980年第五期p.65~72

人们日益用固态电子学来把工况的一次物位传感器信号转换成为现代控制设备所能接收的标准信号。微处理机正为更灵活的应用增添数字化的能力。本文即论述了这门古老的、日益变化的学科最近的一些创新。

张佳峰 蒋依群译自《Control Engineering》Nov 1979, p.47~51