

中子水分计

NEUTRON MOISTURE GAUGES

刘圣康 著 吴治华 审



原子能出版社

京新登字 007 号

内 容 简 介

本书内容包括:中子水分计概论、中子水分计原理基础、插入型中子水分计、表面型中子水分计、透射型中子水分计、散射型中子水分计、带密度修正的水分计、中子源、核探测器和辐射防护。

本书是从事放射性同位素仪表(特别是中子水分计)研制及应用方面的工作人员的参考书,也可作为高等院校核物理及核技术等专业的教学参考书。

中子水分计

刘圣康 著

吴治华 审

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/32 ·印张 8.125·字数 182 千字

1992 年 10 月北京第一版·1992 年 10 月北京第一次印刷

印数 1—500

ISBN7-5022-0641-8

TH·2 定价:5.00 元

前 言

自 1952 年加德纳利用费米年龄理论研究插入型中子水分计探头以来,中子物理已被应用到中子水分计的研究领域。1970 年,国际原子能机构总结了一些国家的研制经验,出版了一本关于中子水分计的理论和实践的技术报告。但该报告主要讨论的是插入型中子水分计,而且其应用对象限于农业土壤的研究。后来,中子水分计的类型又增加了表面型、透射型和散射型等。随着仪表技术发展到微机化,又出现了几种带密度修正的中子水分计。应用领域由农业扩展到建筑、交通以及工业自动化过程控制。

南京大学中子实验室从 1974 年起开始研究中子水分计,研究类型也已涉及插入型、表面型、透射型、散射型以及带密度修正的中子水分计。由于教学的需要,作者在 1982 年编写了《农用中子水分计》讲义,在 1983 年编写了《中子水分计》讲义,在 1986 年编写了《中子计原理》讲义。这次出版的《中子水分计》是在上述讲义基础上修改补充而成的。除介绍国内外研究成果外,重点介绍与作者有关的研究成果。

出版本书的目的是为了扩大中子水分计的应用,培养研制中子水分计的人才,进而促进中子水分计技术的进一步发展。

本书共 10 章,其中第 3 章到第 7 章为主体,分别介绍插入型、表面型、透射型、散射型及带密度修正的水分计原理、结构、标定和应用等。第 1 章介绍发展概况、分类和用途。第 2 章

介绍各种中子水分计原理的物理基础。第 8 章和第 9 章分别介绍中子水分计的主要器件中子源和探测器。第 10 章介绍中子水分计所涉及的辐射防护问题,它是推广中子水分计所必需的知识。因此,非核物理专业毕业的科技工作者也可以阅读本书,并参加中子水分计的推广应用工作。

本书经吴治华教授审阅,在此表示衷心的感谢。

刘圣康

1990. 5. 31.

目 录

1. 中子水分计概论.....	(1)
1.1. 发展概况	(1)
1.1.1. 国外概况	(1)
1.1.2. 国内概况	(3)
1.2. 水分的定义及其测量方法	(6)
1.3. 中子水分计的分类	(7)
1.3.1. 按测量方式分类	(7)
1.3.2. 按测量原理分类	(8)
1.3.3. 按装置分类	(11)
1.3.4. 高精度中子水分计的分类	(12)
1.4. 中子水分计的用途	(13)
1.4.1. 基本建设方面	(13)
1.4.2. 开发能源方面	(14)
1.4.3. 节约能源方面	(14)
1.4.4. 工业生产方面	(15)
1.4.5. 农业土壤方面	(15)
1.4.6. 水利水文方面	(16)
2. 中子水分计原理的基础	(17)
2.1. 中子与原子核的作用	(17)
2.1.1. 中子截面	(17)
2.1.2. 吸收	(21)
2.1.3. 散射	(24)

2.1.4. 核数据	(25)
2.2. 中子的减速与热化	(27)
2.2.1. 弹性散射时中子能量的变化	(27)
2.2.2. 减速能力	(29)
2.2.3. 减速过程中的能谱	(30)
2.2.4. 热化	(31)
2.2.5. 热中子谱	(31)
2.3. 中子在物质中的空间分布	(34)
2.3.1. 中子在物质中运动的路程	(34)
2.3.2. 单速扩散方程	(39)
2.3.3. 费米年龄方程	(44)
2.3.4. 多组理论	(49)
3. 插入型中子水分计	(56)
3.1. 原理	(56)
3.1.1. 中子空间分布	(56)
3.1.2. 水分响应曲线	(58)
3.1.3. 测量体积	(62)
3.2. 结构	(66)
3.2.1. 探头	(66)
3.2.2. 计数装置	(69)
3.3. 实验标定	(73)
3.3.1. 水分计的标定	(73)
3.3.2. 其他用途标定	(77)
3.4. 理论计算响应	(80)
3.4.1. 计算 D_3 和 L_3	(81)
3.4.2. 计算 L_1 和 L_2	(82)
3.4.3. 计算探测器的计数率	(84)

3.5. 影响测量值的因素	(85)
3.5.1. 探头对测量值的影响	(85)
3.5.2. 被测物质对测量值的影响	(85)
3.5.3. 测量条件对测量值的影响	(89)
3.6. 灵敏度与误差	(93)
3.6.1. 相对灵敏度	(93)
3.6.2. 精密度	(94)
3.6.3. 准确度	(94)
3.6.4. 最佳测量时间和总计数	(95)
4. 表面型中子水分计	(98)
4.1. 原理	(98)
4.2. 结构	(99)
4.2.1. 探头	(99)
4.2.2. 计数装置	(100)
4.2.3. 实例	(100)
4.3. 表面型的理论计算	(102)
4.3.1. 数学模型	(102)
4.3.2. 三组模型	(104)
4.3.3. 计算实例	(109)
4.4. 实验标定	(117)
4.4.1. 水分计的标定	(117)
4.4.2. 液位计的标定	(119)
5. 透射型中子水分计	(123)
5.1. 原理	(123)
5.1.1. 衰减法的基本公式	(123)

5.1.2. 水分响应公式	(123)
5.1.3. 灵敏度	(125)
5.1.4. 统计误差	(126)
5.2. 热中子透射计的结构	(127)
5.2.1. 热中子束发射装置	(128)
5.2.2. 样品装置	(135)
5.2.3. 探头	(135)
5.2.4. 计数装置	(135)
5.2.5. 实例	(136)
5.3. 热中子透射计的标定	(137)
5.3.1. 制样	(137)
5.3.2. 测量	(137)
5.3.3. 数据处理	(138)
5.3.4. 标定实例	(138)
5.3.5. 误差	(139)
5.4. 热中子透射计的其他用途	(140)
5.4.1. 测量厚度	(140)
5.4.2. 测量截面	(142)
5.4.3. 测量空隙度	(143)
5.4.4. 测量含钎量	(145)
5.4.5. 测量含硼量	(147)
5.4.6. 测量含氢量	(149)
5.4.7. 测量含氢指数	(150)
5.5. 快中子透射计	(153)
5.5.1. 结构	(153)
5.5.2. 测量水分	(157)
5.5.3. 其他用途	(158)

6. 散射型中子水分计	(160)
6. 1. 原理	(160)
6. 1. 1. 散射中子束强度	(160)
6. 1. 2. 散射型水分计响应	(162)
6. 1. 3. 散射型水分计的灵敏度	(164)
6. 1. 4. 散射型的其他用途	(164)
6. 2. 结构	(165)
6. 2. 1. 热中子束发射装置	(165)
6. 2. 2. 样品装置	(165)
6. 2. 3. 探头	(166)
6. 2. 4. 计数装置	(166)
6. 2. 5. 实例	(166)
6. 3. 标定	(166)
6. 3. 1. 制样	(166)
6. 3. 2. 测量	(167)
6. 3. 3. 标定实例	(167)
6. 3. 4. 误差	(168)
6. 4. 水分响应曲线的非线性问题	(168)
7. 带密度修正的水分计	(172)
7. 1. γ 射线测密度的原理	(172)
7. 1. 1. 透射型密度测量	(172)
7. 1. 2. 表面型密度测量	(175)
7. 1. 3. 插入型密度测量	(177)
7. 2. 插入型带密度修正的水分计	(178)
7. 2. 1. 原理	(178)
7. 2. 2. 结构	(181)

7.3. 表面型带密度修正的水分计	(183)
7.3.1. 结构	(183)
7.3.2. 实例	(184)
7.4. 透射型带密度修正的水分计	(185)
7.4.1. 热中子- γ 射线透射检测装置	(185)
7.4.2. 改进型透射检测装置	(187)
8. 中子源	(191)
8.1. 常用同位素中子源	(191)
8.1.1. 基本特性	(191)
8.1.2. 常用同位素中子源的性能	(193)
8.1.3. 选择中子源的原则	(199)
8.1.4. 同位素中子源的使用	(200)
8.2. 小型中子发生器	(202)
8.2.1. 中子管	(202)
8.2.2. 地面中子发生器	(203)
8.3. 开关式中子源	(204)
8.3.1. 插入型开关源	(204)
8.3.2. 旋转型开关源	(206)
9. 核探测器	(208)
9.1. 气体探测器	(208)
9.1.1. BF_3 计数管	(208)
9.1.2. 电晕管	(214)
9.1.3. He-3 计数管	(215)
9.1.4. G-M 计数管	(216)
9.1.5. 电离室	(220)

9.2. 闪烁探测器	(223)
9.2.1. 锂玻璃	(224)
9.2.2. 碘化锂闪烁体	(228)
9.2.3. 硫化锌(银)	(229)
9.2.4. 有机闪烁体	(230)
9.2.5. 碘化钠晶体	(230)
9.2.6. 锗酸铋单晶	(231)
10. 辐射防护	(233)
10.1. 辐射量和单位	(233)
10.1.1. 放射性活度	(233)
10.1.2. 吸收剂量	(233)
10.1.3. 照射量	(234)
10.1.4. 剂量当量	(234)
10.2. 辐射防护标准	(235)
10.2.1. 放射性工作人员的剂量限值	(235)
10.2.2. 公众中个人的剂量限值	(236)
10.3. 辐射防护	(236)
10.3.1. 外照射防护的一般方法	(236)
10.3.2. 剂量估算实例	(237)
10.3.3. 屏蔽	(238)
附录	(242)
参考文献	(243)

1. 中子水分计概论

1. 1. 发展概况

在工农业生产和科研部门,经常会遇到要测定物料的水分(含水率)问题。利用中子方法测定水分的仪器叫做中子水分计。

1. 1. 1. 国外概况

国外,50年代初就开始研究测量土壤水分的中子水分计。1952年,加德纳(W. Gardner)等人^[1]开始用费米(Fermi)年龄理论研究插入型中子水分计探头。不少实验工作者也纷纷进行实验研究^[2]。探头内中子源与探测器的相对位置与探测效率和灵敏度是矛盾的,设计时应采取最佳位置。后来,为了测量表面层土壤的水分,又研究了表面型探头^[3]。1966年5月,国际原子能机构(IAEA)在维也纳举行了中子水分计顾问会议,讨论了中子土壤水分计的术语定义问题。1970年,国际原子能机构总结了各国的研究成果,出版了一本关于中子水分计的理论和技术报告^[4]。这时,插入型中子水分计的原理已基本弄清楚了。但是,结合具体应用对象,技术和方法还在不断更新。1971年,手提式中子水分计已用来测量建筑材料的水分和密度^[5]。70年代已经出现数字显示的水分密度计。目前已发展到了微机化阶段。例如,美国索罗克斯列克斯(Troxlex)公司生产的3411B型为表面型水分密度联合计(微

机化)已大量生产。该仪表能给出湿密度、干容重,还能对非自由水的氢加以自动补偿,已广泛用于农田、公路和建筑方面。

1960年后,国外大量发展工业自动化生产用的中子水分计(即固定式中子水分计)。例如,日本日立公司生产RMB-D型,东芝公司生产AMF-76311(插入型)和AMF-76363(表面型)。德国、丹麦、法国、美国和苏联等均有自己生产的中子水分计。固定式中子水分计用于生产过程的自动控制水分,是从钢铁工业开始的^[6,7]。后来推广到建筑和机械铸造等工业上。1977年,捷克斯洛伐克用来测量肥料溶液中的水分^[8],波兰设计了数字数据交换的焦炭中子水分计^[9]。1980年,日本研制成透射型高精度水分计,用来测定焦炭水分和密度^[10],据报道,每台高炉每年可节约投资10万美元。目前新的检测仪表正向综合多用型发展。例如,1979年澳大利亚用中子- γ 联合计测量块煤的比热、灰分和水^[11]。1978年苏联利用快中子透射计测量输油管内输送油的密度^[12]。

中子水分计的推广应用速度主要受经济发展需要的影响,也受本身技术进步的限制。现以日本开发中子水分计为例。据富永洋(H. Tominaga)^[13]报道,日本工业自动化生产用的中子水分计的应用情况(见图1-1)和其他放射性同位素仪表一样,增长速度有起伏。有些年份,由于经济发展快,应用量便增加很快。

以上所述中子水分计均不能用于小样品测量。检测小样品,需要利用透射型或散射型。1976年,美国海尔夫(S. Helf)^[14]利用快中子减速透射方法研究了检验食品的水分问题。美国皮卡汀(Picatinuy)兵工厂用它来测量粉末食物和罐头食品的水分。1979年,英国奇列斯(H. L. Giles)^[15]用慢中子透射计测量铁和非铁合金中的含硼量。1985年,意大利曼西

尼 (C. Mancini)^[16]利用中子透射法测量硬币中的含银量。不过,这种取样式的中子仪表,尚待开发。

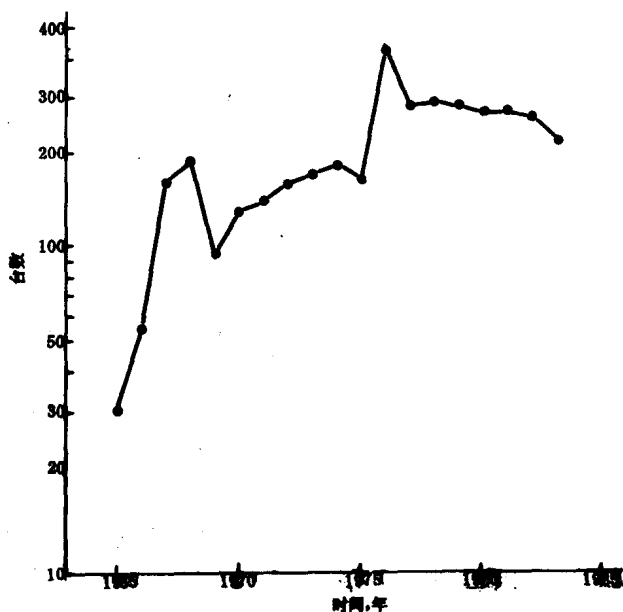


图 1-1 日本中子水分计使用情况

1.1.2. 国内概况

我国 60 年代就开始注意中子水分计。但开始认真研究是 70 年代的事^[17]。1978 年,南京大学研制成一种插入型中子水分计^[18],鉴定后交无锡市无线电八厂生产,定名为 SHD-1 型中子水分计(湿度仪)。大部分售给钢铁厂。例如,攀枝花钢铁公司、鞍山钢铁公司、武汉钢铁公司等均采用该仪表测量高炉上料系统的焦炭水分。梅山冶金公司也用插入型中子水分计

测高炉焦炭水分。1981年南京大学研制了一种采用电晕管的中子水分计^[19],交华东电子管厂试制工业样机,定名为DG6010型中子水分计。1985年江苏省建筑科研所与南京大学协作研制了微机化中子水分计^[20],并在南京市构件二厂混凝土搅拌楼生产线上在线试用成功^[21]。该仪表特点:除多探头测定水分外,还具有减砂补水功能。1990年南京大学研制成高精度插入型中子水分计,又在梅山冶金公司高炉试用,测焦炭水分。首都钢铁公司^[22]除使用进口的表面型中子水分计外,还对表面型探头进行了改进。杭州铁合金厂使用首钢生产的表面型中子水分计测量焦炭水分。上海宝山钢铁总厂^[23],将从日本引进的2台表面型中子水分计用于炼铁厂的焦炭槽壁上,测量焦炭的水分。还将4台插入型中子水分计装在烧结厂的原料、硅砂和粉焦槽内,主要测量矿料水分。中国原子能科学研究院研制的插入型中子水分计^[24],在宁波玻璃厂试用成功。大连应用技术研究所也研制了SZ-1型(数字显示)和SZ-100型(微机化)中子水分计^[25]。南京大学还对插入型中子水分计进行了基础研究工作。研究了插入型探头对黄砂^[26]、氯化球团料^[27]和焦炭^[28]等水分的响应问题。研究了密度对插入型探头响应的影响问题^[29]。还研究了超热中子水分计有关的中子空间分布问题^[30]。兰州大学也研究了插入型中子水分计的响应曲线^[31]。总之,国内对固定式中子水分计的方法研究、仪器研制和推广应用均做了大量的工作,并取得了可喜的经济效益。但在扩大应用面上,尚待努力。

70年代,我国也研制了一批手提式中子水分计。兰州大学研制了冻土勘测用中子水分计^[32]。已被兰州冰川冻土研究所用来检测风火山铁路试验路堤等冻土水分^[33]。南京大学与江苏省农科院协作研制了手提式中子土壤水分计^[34],后来南

京大学改进成数字式中子水分计^[35],经山东电力设计院试用^[36],结果令人满意。江苏省农科院研制成采用铯玻璃探头的 LNW-50 型中子土壤水分仪^[37],已在农业等部门推广应用,主要测土壤水分。最近又研制成 LNW-50C 型智能中子水分计,扩大了测量土壤水分的量程。中国原子能科学研究院已研制成背桶式中子水分计^[38]。山西农科院利用 ZS-100 中子水分仪研究了粒用苋玉米的耗水特性^[39]。山东定陶邓集试验场利用美国的 3223 型和国产 LZS 型中子水分计测定了水文地质中的参数^[40]。湖南省交通科学研究所研制成 NH-A 型中子土基含水量测定仪^[41],属表面型中子水分计,经黄花机场等试用,已投产。该所还研制成 NDH-A 型核子土基密度含水量联合测定仪^[42]。南京水利科学研究院和北京核仪器厂也共同研制了 FT-628 表面型核子水分密度计。杭州机械设计研究所已用表面型水分密度计检测振动压路机的压实性能^[43],测量沥青混凝土中的沥青含量。南京大学研制的 Z86 型 $n-\gamma$ 水分密度联测仪是插入型的,经云南鲁布革电站大坝和南京农业大学试用,证明性能良好。北京核仪器厂^[44]也研制了同类仪表(FT631 型湿度密度联合计)。总之,我国对手提式中子水分计的研制和应用,都取得了一定的成果。

至于取样式中子水分计,目前国内只有南京大学一家研制,并开始应用。1982 年,南京大学研制成热中子透射计^[45](即透射型热中子水分计)和热中子散射计^[46](即散射型热中子水分计)。已经用来测量小样品水分^[47],测量石油岩样的含氢指数^[48]和孔隙度^[49],测定磁性材料的含钆量^[50],测定 γ - Fe_2O_3 中的含氢结构^[51]等。1985 年还研制成了热中子- γ 射线透射检测装置。在此基础上,1990 年研制成透射型中子- γ 水分密度计,已在南京钢铁厂氯化球团分厂试用,测氯化球团料

经密度修正的水分值。

综上所述,我国的中子水分计还处在研制和试用阶段,虽然已取得了不少成果^[52],但是还有大量工作要做。

1.2. 水分的定义及其测量方法

水分是指单位体积物料内的含水量,所以也叫含水率,或叫湿度。表示水分的方式很多,最常用的为容重和重量百分比水分。

农业科研部门,一般采用取样烘干法来确定物质的水分。设湿物质的取样体积为 $V\text{cm}^3$,重量为 $W_1\text{g}$,在 105°C 下烘干后,重量减轻到 $W_2\text{g}$,那末容重水分

$$m = \frac{W_1 - W_2}{V} \quad \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

如果在湿物质体积 V 内,水体积为 V_w ,那末体积百分比水分为

$$m(\text{vol}\%) = \frac{V_w}{V} \times 100\%$$

因为水的密度近似为 $1\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,所以容重水分与体积水分在数值上相等。

在生产部门,为了简单起见,用取样烘干法确定水分时,只称重量,不量体积。设湿物质重量为 $W_1\text{g}$,烘干后重量为 $W_2\text{g}$,那末重量百分比水分为

$$m(\text{wt}\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%$$

当然,还有其他特殊表示法。在标定和使用中子水分计时,首先应该弄清楚使用什么水分表示法。

对于砂土,由于存在砂、水和空气等,使得水分表示法间的关系复杂化了。例如,长江细砂的重量百分比水分与容重水分间的关系如图1-2所示。在 0.03 到 $0.30\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 间存在简单的