

中子水分仪测量方式的改进研究

龚亚林¹, 赵中华², 吴志强¹, 李岩峰¹,
张 伟¹, 宋青锋¹, 刘 辉¹, 魏晓云¹

(1. 丹东东方测控技术有限公司, 辽宁 丹东 118002;

2. 辽宁工程地质职业学院 机电系, 辽宁 丹东 118008)

摘要: 中子水分仪在工业现场应用时, 有时会因被测量物料中水分不均匀而引起测量误差。本工作利用蒙特卡罗方法模拟了中子水分仪应用中由于物料中水分不均匀所带来的测量误差。为了减小由于水分不均匀带来的测量误差, 提出了一种新型的测量方式, 即透射加散射测量方式。实验证明, 透射加散射测量方式能够有效降低中子水分仪在被测量物料水分分布不均匀情况下的测量误差。该方法用于水分分布复杂条件下的现场测量还需作进一步的分析和研究。

关键词: 中子水分仪; 水分不均匀; 透射加散射测量

中图分类号: TL816.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7512(2010)01-0022-06

Optimization on Measurement Method for Neutron Moisture Meter

GONG Ya-lin¹, ZHAO Zhong-hua², WU Zhi-qiang¹, LI Yan-feng,
ZHANG Wei¹, SONG Qing-feng¹, LIU Hui¹, WEI Xiao-yun¹

(1. Dandong Dongfang Measurement & Control Technology Co., Ltd., Dandong 118002, China;

2. Liaoning Engineer Geology Vocational College, Dandong 118008, China)

Abstract: When the water in the measured material is nonuniformity, the measured results of the neutron moisture meter in the field may have errors, so the measured errors of the moisture meter associated with the water nonuniformity in material were simulated by Monte Carlo method. A new measurement method of moisture meter named “transmission plus scatter” was put forward. The experiment results show that the new measurement method can reduce the error even if the water in the material is nonuniformity.

Key words: moisture meter; water nonuniformity; measurment of transmission plus back-scatter

中子水分仪主要包括中子源和中子探测器^[1]。从中子源放出的快中子照射到物料中, 被氢原子慢化, 变成慢中子。慢中子穿过物料后被

探测器接收。慢中子的产额与物料中水的含量有关。利用检测慢中子计数反映物料含水率的方法称为中子测水技术。

中子水分仪目前普遍采用的测量方式有透射和散射两种^[2]。透射测量时,中子源与中子探测器位于物料的两侧,中子源发出快中子,被含水分的物料慢化,透射的慢中子被位于物料异侧的中子探测器接收。透射式测量时,由于中子的穿透性强,中子与物料中的氢原子充分作用,测量结果的代表性较高。但当物料过厚或含水量过高时,中子无法穿透物料,因此也无法被探测器接收。

采用散射测量方式时,中子源与中子探测器位于物料的同侧,快中子被物料中的氢原子慢化后,经散射被中子探测器接收。在这种测量方式下,无论物料有多厚,散射中子总能够反映水分含量。散射式中子水分仪的优势在于不受物料厚度的限制,总能测量出物料中水分含量,因位于探测器远端的物料产生的慢中子不易被探测器接收到,水分测量值的代表性差些。

如果物料中的水分均匀,透射测量方式与散射测量方式在满足各自的测量条件下,测量的水分值均是准确的。若物料中水分分布不均匀,如有水分分层现象,局部水分过大或过小情况,物料内部的中子通量将发生变化,导致其慢中子产额有别于水分均匀情况,从而引起中子水分仪的测量误差。

为了消除或减弱因物料中水分不均匀引起的水分测量误差,本工作拟采用透射加散射复合测量方式进行测量。

1 透射加散射测量原理

透射加散射测量方式示意图示于图 1。在此测量方式下,采用了两个中子探测器。中子源发射出的中子被物料中的水分慢化后,形成慢中子,一部分被位于物料另一侧的中子探测器接收,另一部分被位于放射源同一侧的中子探测器接收。这两个中子探测器的计数均被计入水分值中。大部分情况下,测量系统对靠近探测器的物料区域水分响应比较灵敏。在“透射加散射”复合测量方式下,探测器分别位于物料的上部和下部。这样,当物料中水分不均匀时,透射探测器和散射探测器会出现相反的计数偏差效应。这种相反的偏差效应表现为:当透射探测器慢中子计数偏高时,散射探测器慢中子计数偏低;而当透射探测器慢中子计数偏低时,散射探测器慢中子计数偏高。利用这一特点,透射加散射复合

测量方式能够减小或消除水分不均匀所引起的水分测量误差。

本工作拟从蒙特卡罗软件模拟与实验两方面着手,分析和验证“透射加散射”复合测量方式的可行性和可靠性,在物料水分分布不均匀情况下,对测量误差予以改进。

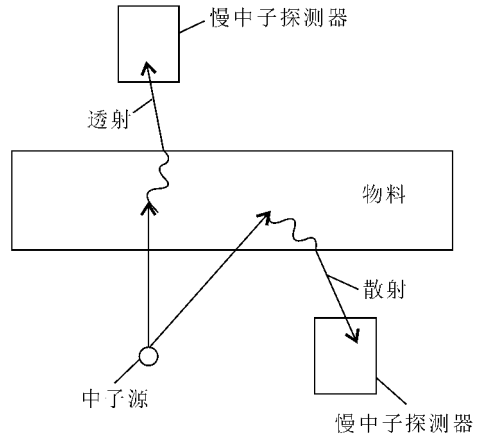


图 1 透射加散射复合测量方式示意图

2 蒙特卡罗模拟

利用蒙特卡罗软件 MCNP 对中子水分仪的 3 种测量方式(透射、散射、透射加散射)进行模拟计算,分析物料中水分不均匀情况下水分的测量误差。为了消除各种不确定因素对水分测量分析的影响,重点分析水分不均匀引起的水分测量误差。本工作建立的装置几何模型简单化、理想化,与实验装置相比,省略了源装置的屏蔽结构和探测器的金属外壳等几何单元。

2.1 透射测量方式模拟

利用蒙特卡罗方法模拟透射式中子水分仪的测量系统。分两种情况模拟,一种是物料中水分分布均匀,另一种是物料中水分分布不均匀。

2.1.1 水分分布均匀时的模拟

按照图 1 的透射测量装置,利用 MCNP 建立理想的几何模型^[3]。物料为 20 cm 厚含水铁矿粉,中子源位于物料下方 20 cm 处,按²⁴¹Am-Be 源的能量谱分布,各向同性发射,平均能量为 4.4 MeV。探测器为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的³He 探测器。中子源发射的快中子与含不同水分的铁矿粉发生相互作用后,在探测器区域采用 F1 计数器记录慢中子通量,将此通量乘以源强,得到慢中子相对计数。

当物料中水分分布均匀时,改变铁矿粉的水

分含量分别为 6%、7%、8%、9% 和 10%，利用蒙特卡罗方法模拟得到相应的一组慢中子相对计数。能量在 1 eV 以下的慢中子相对计数与水分的关系曲线示于图 2。

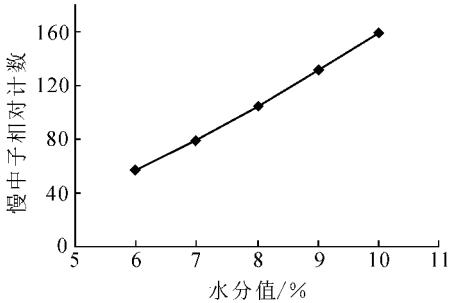


图 2 慢中子相对计数与水分值的关系

对上述 5 个水分点及相应的慢中子相对计数进行多项式拟合,得到的拟合函数为:

$$W = 3.917 \times 10^{-4} X + 0.038 \quad (1)$$

(1)式中, W 为物料中水分值; X 为慢中子相对计数。

利用此函数关系,将水分仪探测到的慢中子计数代入(1)式中,即可算得待测物料所含水分值。(1)式的获得即相当于中子水分仪的标定过程。

2.1.2 水分不均匀时的模拟

为简单起见,对物料上下两层水分值不同的情况进行模拟。上部 and 下部物料水分均匀,但两部分水分值不同。上下两层厚度之比为 1:1,忽略水分不同对物料密度的影响,则上下两层物料的质量之比也为 1:1。上下两层的水分含量分别为 5% 和 7%, 6% 和 8%, 7% 和 9%, 8% 和 10%, 9% 和 11%。整个物料的折合水分值为 6%、7%、8%、9%、10%。定义这种情况为“水分不均匀 1”,经模拟软件计算得到能量在 1 eV 以下的慢中子相对计数与水分的关系,结果示于图 3。

改变上下两层物料的水分配比,得到另 3 种情况的慢中子计数。这三种情况定义为“水分不均匀 2”、“水分不均匀 3”和“水分不均匀 4”。“水分不均匀 2”中的上下两层的水分为 4% 和 8%, 5% 和 9%, 6% 和 10%, 7% 和 11%, 8% 和 12%; “水分不均匀 3”中上下两层的水分为 7% 和 5%, 8% 和 6%, 9% 和 7%, 10% 和 8%, 11% 和 9%; “水分不均匀 4”中上下两层的水分为

8% 和 4%, 9% 和 5%, 10% 和 6%, 11% 和 7%, 12% 和 8%。为了直观地比较这几种情况下的慢中子计数,将水分均匀的情况和四种水分不均匀情况的慢中子计数一并列入图 4 中。从图 4 可看出,与“水分均匀”情况测得的慢中子相对计数相比,“水分不均匀 1”和“水分不均匀 2”偏低,而“水分不均匀 3”和“水分不均匀 4”偏高。上下两层物料的水分差异越大,即不均匀程度越高,与水分均匀情况的慢中子相对计数相比,偏离越多。

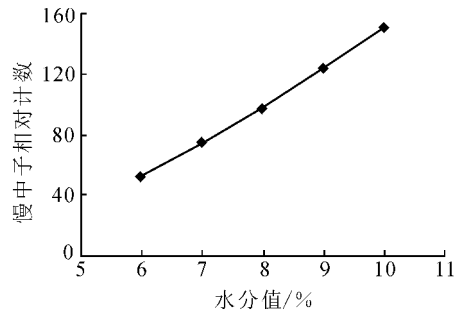


图 3 水分不均匀情况下慢中子相对计数与水分值的关系

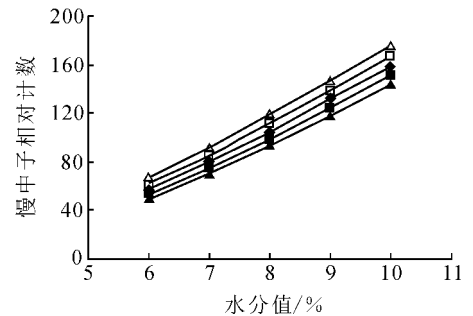


图 4 透射测量方式慢中子模拟相对计数

◆——水分均匀; ■——水分不均匀 1;
▲——水分不均匀 2; □——水分不均匀 3;
△——水分不均匀 4

将水分不均匀情况的慢中子计数分别代入(1)式,可得到透射方式下 4 种水分不均匀情况的模拟水分值,结果示于图 5。由图 5 可知,在透射测量模式下,水分不均匀的第一种情况的模拟水分值比真实值平均低 0.24%,第二种情况的模拟水分值比真实值平均低 0.35%,第三种情况的模拟水分值比真实值平均高 0.26%,第四种情况的模拟水分值比真实值平均高 0.54%。

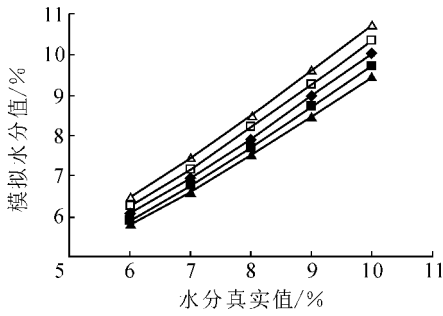


图 5 透射测量方式模拟水分值

◆——水分均匀;■——水分不均匀 1;
▲——水分不均匀 2;□——水分不均匀 3;
△——水分不均匀 4

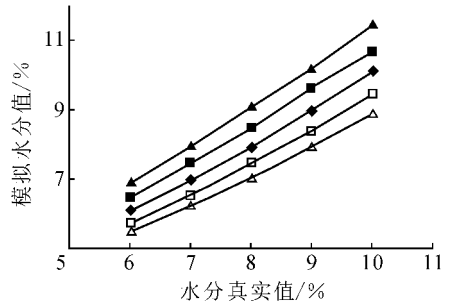


图 7 散射测量方式模拟水分值

◆——水分均匀;■——水分不均匀 1;
▲——水分不均匀 2;□——水分不均匀 3;
△——水分不均匀 4

2.2 散射测量方式模拟

与 1.1 节模拟过程相同,利用 MCNP 软件建立散射测量方式的几何模型。中子源发射快中子,与含水分的氧化铁物料发生慢化作用,散射的慢中子被位于物料同一侧的慢中子探测器接收,由计数器记录在探测器区域的慢中子计数。

在物料水分均匀情况下,采用散射测量方式,水分值与慢中子相对计数的函数关系为:

$$W = 4.686 \times 10^{-4} X + 0.038 \quad (2)$$

(2)式中, W 为物料中水分值; X 为慢中子相对计数。

同样地,模拟了中子水分仪散射测量方式下水分分布不均匀的 4 种情况的慢中子相对计数,结果示于图 6。为了比较,将水分均匀情况的慢中子相对计数也一并列入图 6 中。将慢中子相对计数代入(2)式,得到各种情况下的模拟水分值,结果示于图 7。

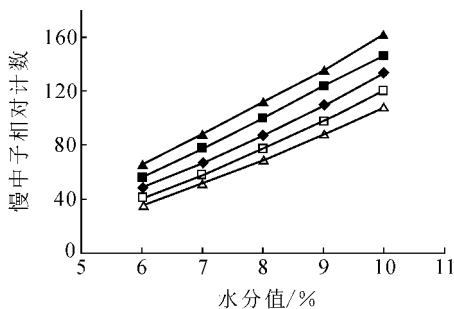


图 6 散射测量方式慢中子模拟相对计数

◆——水分均匀;■——水分不均匀 1;
▲——水分不均匀 2;□——水分不均匀 3;
△——水分不均匀 4

由图 7 可知,散射测量方式下,水分不均匀的第一种情况的模拟水分值比真实值平均高 0.53%,第二种情况的模拟水分值比真实值平均高 1.11%,第三种情况的模拟水分值比真实值平均低 0.48%,第四种情况的模拟水分值比真实值平均低 0.88%。

2.3 透射加散射复合测量方式模拟

在物料水分均匀情况下,采用透射加散射复合测量方式,水分值与慢中子相对计数的函数关系为:

$$W = 2.134 \times 10^{-4} X + 0.038 \quad (3)$$

(3)式中, W 为物料中水分值; X 为透射与散射慢中子相对计数之和。

同样地,通过蒙特卡罗模拟软件得到了中子水分仪在透射加散射复合测量方式下水分分布不均匀的 4 种情况的慢中子相对计数,结果示于图 8。为了比较,将水分均匀情况下的慢中子相对计数也一并列入图 8 中,然后将慢中子相对计数代入(3)式,得到各种情况下的模拟水分值,结果示于图 9。

由图 9 可知,在透射加散射测量方式下,水分不均匀的第一种情况的模拟水分值比真实值平均高 0.14%,第二种情况的模拟水分值比真实值平均高 0.34%,第三种情况的模拟水分值比真实值平均低 0.10%,第四种情况的模拟水分值比真实值平均低 0.13%。

与透射或散射测量方式相比,在 4 种水分不均匀情况下,透射加散射测量方式与真实值最接近,即测量误差最小。蒙特卡罗模拟结果表明,在水分不均匀情况下,透射加散射测量方式的测量误差小于前两种测量方式。

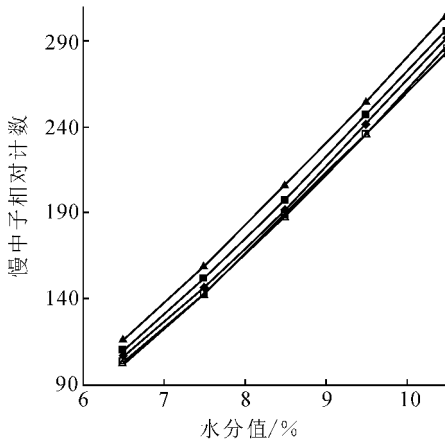


图 8 透射加散射测量方式慢中子模拟相对计数

◆——水分均匀; ■——水分不均匀 1;
▲——水分不均匀 2; □——水分不均匀 3;
△——水分不均匀 4

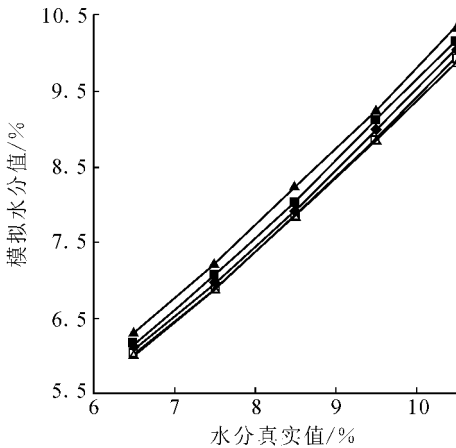


图 9 透射加散射测量方式模拟水分值

◆——水分均匀; ■——水分不均匀 1;
▲——水分不均匀 2; □——水分不均匀 3;
△——水分不均匀 4

3 实验验证

取两个容积相同的容器,尺寸为 500 mm×500 mm×100 mm,在容器中加入等量铁矿粉,视为两层物料,分别在两个容器中加入等量的水,并搅拌均匀,则两个容器物料所含水量相等,整个物料视为水分均匀分布;将不等量的水分别加入上下两个容器中,水量多的容器置于水量少的容器上面,视为上湿下干分布,反之为上干下湿分布。水分分布情况列于表 1^[4]。

采用透射测量方式,放射源位于物料下方,探测器位于物料上方,测得的水分值示于图 10。由图 10 可知,与水分均匀情况相比,“上干下湿”

的水分测量值比真实值偏低,平均低 0.70%;而“上湿下干”的水分测量值比真实值偏高,平均高 0.54%。

表 1 铁矿粉水分分布情况

		水分含量/%					
		均匀分布		上湿下干分布		上干下湿分布	
上层	下层	上层	下层	上层	下层	上层	下层
5.4	5.4	6.4	4.4	4.4	6.4	4.4	6.4
6.7	6.7	8.2	5.4	5.4	8.2	5.4	8.2
8.2	8.2	9.3	6.9	6.9	9.3	6.9	9.3
9.5	9.5	10.6	8.4	8.4	10.6	8.4	10.6
10.3	10.3	11.3	9.4	9.4	11.3	9.4	11.3
11.1	11.1	12.1	10.2	10.2	12.1	10.2	12.1
11.8	11.8	12.5	11.1	11.1	12.5	11.1	12.5
12.4	12.4	13.2	11.6	11.6	13.2	11.6	13.2

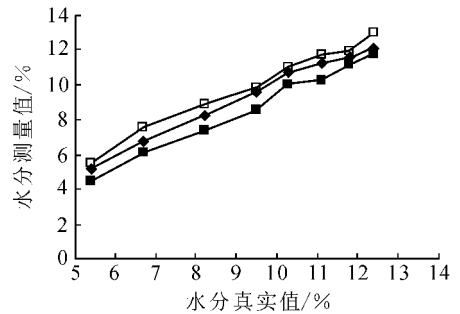


图 10 透射测量方式实验水分值

◆——水分均匀; ■——上干下湿; □——上湿下干

采用散射测量方式,放射源与探测器均位于物料下方,测得的水分值示于图 11。由图 11 可知,与水分均匀情况相比,“上干下湿”的水分测量值比真实值偏高,平均高 0.96%;而“上湿下干”的水分测量值比真实值偏低,平均低 0.85%。

采用透射加散射复合测量方式,放射源仍然在物料下方,但物料上方与物料下方均安装中子探测器。这样,透射慢中子与散射慢中子同时被测量系统采集,参与到水分值的计算中。测得的水分值示于图 12。对比图 10、图 11 和图 12 可明显看出,采用透射加散射复合测量方式后,对于“上干下湿”和“上湿下干”的水分不均匀情况,所测水分值与水分均匀时非常接近,计算结果显示,平均差值小于 0.20%。

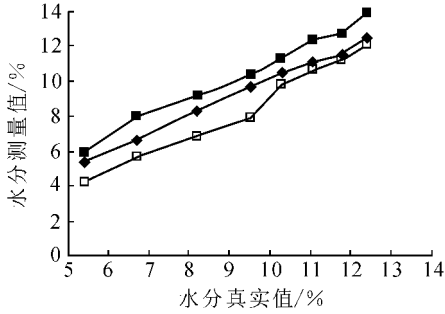


图 11 散射测量方式实验水分值

◆——水分均匀;■——上干下湿;□——上湿下干

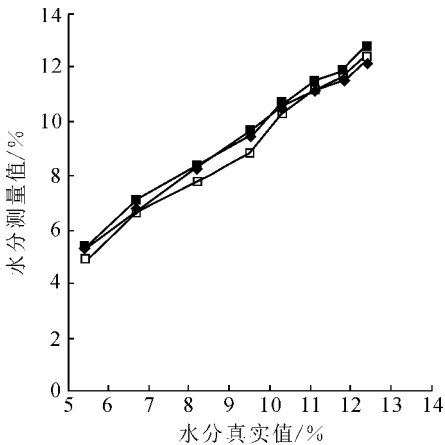


图 12 透射加散射测量方式实验水分值

◆——水分均匀;■——上干下湿;□——上湿下干

上述实验结果表明,对于物料水分上下分层情况,透射加散射复合测量方式的测量误差比透射和散射测量方式的均小。与蒙卡模拟计算结果相比,测量误差的趋势和规律是一致的,而实验的水分测量误差偏高,主要是由于实验时仪表的系统误差和统计涨落等原因所致。

在工业现场,物料水分不均匀的情况比较复杂,这里只对最典型和简单的情况做了实验测量。对于其它复杂的水分不均匀的情况,透射加散射测量方式的测量误差如何,还需深入研究。

4 结 论

以上结果表明,采用透射加散射复合测量方式能够抵消透射与散射模式因水分分布不均匀引起的不良效应,在很大程度上克服了物料中水分不均匀对测量结果的影响。

但需要指出的是,本工作的研究仅局限于中子透射和散射测量条件同时满足的情况,要求物料不能过厚或水分不能过大。在工业现场应用中,物料水分分布不均匀的情况较为复杂,本工作的模拟和实验验证仅针对几种典型简单的情况。对于较为复杂的水分分布不均匀分布情况,“透射加散射”测量方式的测量误差及其水分值的准确定值尚需作进一步分析和研究。

通常情况下,皮带式的中子水分仪均可采用透射加散射测量方式来提高测量的适应性和准确度。

参考文献:

- [1] 刘圣康. 中子水分计[M]. 北京:原子能出版社, 1992:1-9.
- [2] Brian Sowerby, Cheryl Lim, James Tickner. Bulk material analyzer for on-conveyor belt analysis; US, 6362477[P]. 2002-03-26.
- [3] Briesmeister JF. MCNP4C: Monte Carlo N-particle transport code system[M]. Los Alamos. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2000: 97-104.
- [4] 龚亚林,吴志强,李岩峰. 双端水分测量方法:中国,101074938A[P]. 2007-11-21.