

# 散射介质中层间杂质检测效率的影响因素及分析\*

周 飞 丁天怀<sup>†</sup>

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

(2010 年 3 月 26 日收到; 2010 年 7 月 20 日收到修改稿)

散射介质中层间杂质检测是一个非常重要的研究课题. 改进现有的 Monte Carlo 方法, 模拟大量光子在散射介质中的传输, 得到入射光强、杂质埋藏深度、介质折射率、介质散射系数和各向异性因子对光学透反射成像法检测层间杂质效率的影响规律. 结果表明, 入射光强、杂质埋藏深度和介质折射率对透反射成像检测结果均有影响, 且影响规律相似. 增加入射光强、减小杂质埋藏深度或减小介质折射率均可提高反射光成像的检测效率; 增大入射光强、减小介质折射率、减小介质散射系数或增大各向异性因子均可提高透射光成像的检测效率. 这些规律对散射介质中层间杂质检测具有一定指导意义.

**关键词:** 散射介质, 层间杂质, Monte Carlo 方法, 透反射成像

**PACC:** 0760, 8760, 4225F

## 1. 引 言

散射介质中杂质的检测(如生物组织中肿瘤检测<sup>[1]</sup>、浑浊液中颗粒检测<sup>[2]</sup>、皮棉中杂质检测<sup>[3]</sup>)是非常重要的研究课题. 当光入射到含有杂质的散射介质内部时, 由于光与介质、光与杂质的相互作用, 介质表面反射光和透射光携带了一定的内部信息, 因此可以利用出射光检测内部杂质. 然而, 光与杂质相互作用得到的有用信息在传输到介质表面的过程中被大量散射, 导致层间杂质不易检测, 甚至无法检测. 无论反射光还是透射光成像, 成像结果都会受到光强、介质折射率等多种因素的影响, 进而影响到杂质的检测效率. 因此, 研究各种因素对透反射成像检测杂质效率的影响规律非常重要, 而光在散射介质中的传输理论则是研究的基础.

光在散射介质中的传输是一个非常复杂的过程. 典型的传输理论为辐射传输理论<sup>[4]</sup>, 该理论一般难以得到解析解, 近似得到的结果有 Kubelka-Munk 理论<sup>[5]</sup>和漫射近似(diffusion approximation)理论<sup>[6]</sup>, 其中后者使用范围较广. 尽管漫射近似理论可以解决一些问题<sup>[7]</sup>, 其仍有特定的适用范围. Kim 和 Ishimaru<sup>[8]</sup>发现漫射近似理论只在各向异性因子  $g \leq 0.85$  的稳态条件下适用, 但在实际应用中许

多散射介质(如人体乳房组织、脑灰质和脑白质组织等)的各向异性因子均超过 0.85, 血液中的各向异性因子更是达到 0.99<sup>[9]</sup>. 对散射介质中的光传输问题, 也可以用统计方法进行描述. 随着计算机技术的不断发展, 科研工作者一直寻找能够用于处理散射介质中光传输的数值模拟方法, 用计算机真实地模拟光在散射介质中的传输过程, Monte Carlo 统计方法<sup>[10]</sup>就是最具有代表性的方法. Monte Carlo 方法得到的结果依赖于对大量光子的统计. 由于模拟得到的结果与实验结果比较符合<sup>[11,12]</sup>, Monte Carlo 方法被越来越多的科研工作者所采用<sup>[13,14]</sup>.

本文改进现有的 Monte Carlo 方法, 模拟大量光子在散射介质中的传输, 得到入射光强、杂质埋藏深度、介质折射率、介质散射系数和各向异性因子对透反射光学成像检测层间杂质的影响, 进而得到提高层间杂质检测效率的方法.

## 2. 实验条件和参数

图 1(a) 为典型的单个光子与介质相互作用后的散射示意图. 入射光子向量为  $\hat{e}_i$ , 散射向量为  $\hat{e}_s$ . 入射光子沿  $z$  轴正向垂直入射. 光子与介质相互作用后的散射过程可用以下两个过程模拟: 首先光子旋转一个纬度角  $\theta$  (也称散射角) 到达位置 I, 然后

\* 江苏省科技攻关计划(批准号: BE2007056)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: dlnj@tsinghua.edu.cn

再旋转方向角  $\varphi$  到达位置 II.

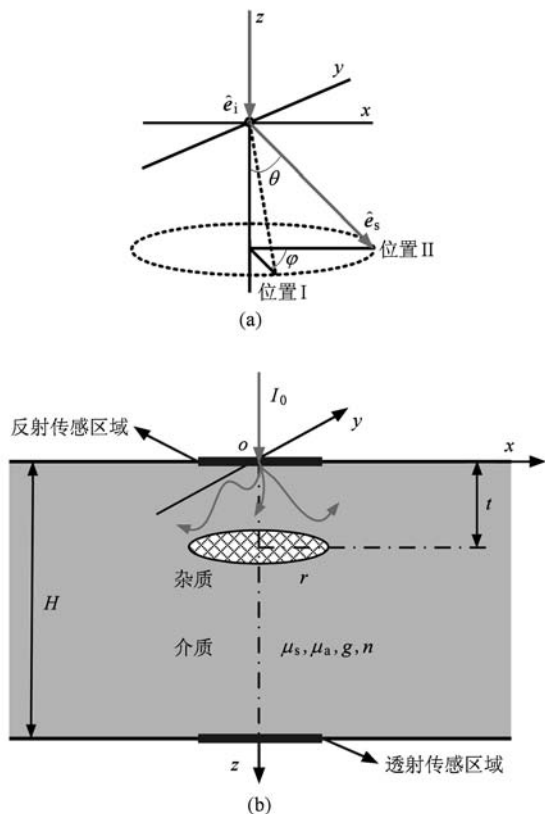


图1 光子与介质相互作用后的散射过程 (a) 单个光子散射, (b) 无限窄单束光垂直入射散射介质

图1(b)为无限窄单束光  $I_0$  从外界环境沿  $z$  轴正向垂直入射散射介质示意图. 不考虑光的波动性及偏振性, 无限窄单束光垂直入射散射介质等效于若干光子分别入射. 当光子经过多次散射到达介质边界时, 其或者逃逸出介质表面, 或者被边界反射而返回介质内部. 入射光强即为入射光子数  $N$ , 每个光子的初始向量  $S_0$  为  $(0, 0, 1)$ , 初始权重  $W = 1$ ; 散射介质厚度为  $H$ , 面积为无穷大, 散射系数和吸收系数分别为  $u_s$  和  $u_a$ , 折射率为  $n$ , 各向异性因子为  $g$ ; 圆形杂质(厚度忽略)的半径  $r = 1$  mm, 杂质埋藏深度为  $t$ . 在反射面和透射面上均有传感区域, 尺寸和杂质尺寸相同.

本文选择如下一组典型实验参数: 外界环境为空气, 折射率为 1; 入射光子数  $N = 10^5$ ; 杂质埋藏深度  $t = 2$  mm; 介质厚度  $H = 10$  mm, 折射率  $n = 1.5$ , 散射相函数选用 Henyey-Greenstein 相函数<sup>[15]</sup>, 散射系数  $u_s = 100$  mm<sup>-1</sup>, 各向异性因子  $g = 0.9$ . 一般杂质的吸收系数比介质的吸收系数要大很多<sup>[16]</sup>. 为方便起见, 本文设介质吸收系数为零, 而杂质的吸收系

数为无穷大; 杂质为理想黑体, 光子接触到杂质即被吸收. 以上大部分参数的取值均参考了文献[17]的数据, 即使数值适当变化也不会对最终结果产生较大影响. 所用计算机的配置为 Intel Pentium D CPU 2.8 GHz 处理器, 1 Gbit 内存. 算法均在 Matlab 环境下实现.

### 3. 改进的 Monte Carlo 算法

图2是改进的 Monte Carlo 算法流程图. 每次模拟实验前, 根据实验的目的分别设定光子数、杂质埋藏深度、介质折射率、介质散射系数和各向异性因子等参数的值.

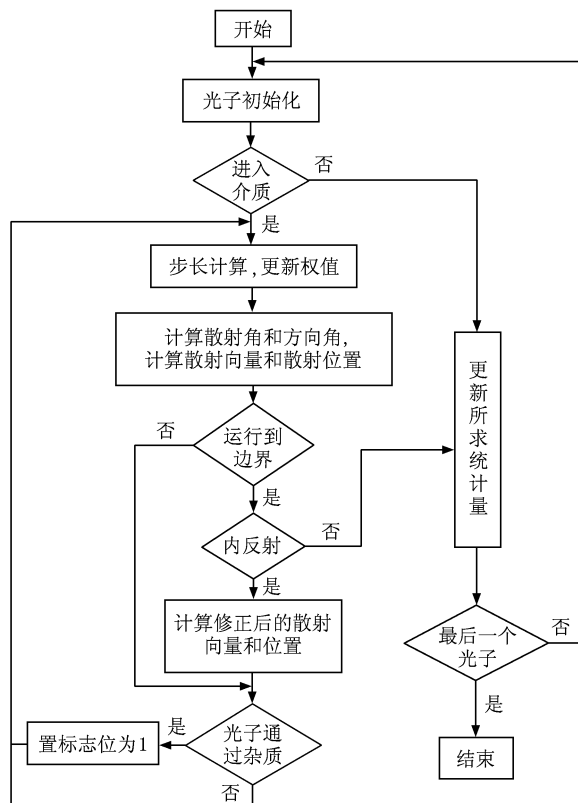


图2 改进的 Monte Carlo 算法流程图

#### 3.1. 基本步骤

光子垂直入射时, 由于介质折射率和外界环境折射率不匹配, 将可能发生外反射. 当外界环境折射率为 1, 介质折射率为  $n$  时, 由 Fresnel 公式得到的外反射率  $R_{or}$  为

$$R_{or} = \frac{(1-n)^2}{(1+n)^2}. \quad (1)$$

用计算机生成一个在区间  $[0, 1]$  均匀分布的随

机数  $R_1$ . 如果  $R_1 < R_{or}$ , 则发生反射; 否则光子进入介质. 进入介质中的光子不断散射, 散射方向由散射角  $\theta$  和方向角  $\varphi$  决定<sup>[18]</sup>, 如图 1(a) 所示. 散射角  $\theta$  的余弦值分布由 Henyey-Greenstein 相函数随机抽样得到. 方向角  $\varphi$  在  $[0, 2\pi]$  内均匀分布, 因为散射是关于原传播方向轴对称<sup>[19]</sup>. 光子经过多次散射后, 有可能会达到边界. 根据坐标值的判断, 如果光子已经到达或超出边界, 由于折射率不匹配, 将可能发生内反射. 设  $\theta_i$  和  $\theta_t$  分别是入射角和透射角, 且符合 Snell 折射定律. 当  $n \sin \theta_i > 1$  时, 一定会发生内反射; 否则, 发生内反射的概率取决于 Fresnel 内反射率  $R_{ir}$ .  $R_{ir}$  的表达式如下:

$$R_{ir} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right]. \quad (2)$$

用计算机生成一个在  $[0, 1]$  均匀分布的随机数  $R_2$ . 如果  $R_2 < R_{ir}$ , 则发生内反射; 否则光子从介质表面出射. 发生内反射后, 反射光子的新行进方向由反射定律决定. 光子从介质表面出射需要更新统计量. 需要统计的信息包括反射面 ( $z=0$ ) 和透射面 ( $z=H$ ) 传感区域出射光子的方向角、权重和位置, 然后得到传感区域出射光子总数和总权重. 光子出射表示该光子的运行结束, 程序运行下一个光子, 直至运行完所有的任务光子.

### 3.2. 杂质检测效率的表征

给每个光子设定一个标志位, 若光子在介质内部运行的路径通过杂质所在区域, 则置标志位为 1. 在一定入射光强下, 设反射传感区域出射的光子中标志位为 1 的光子总权重为  $W_r$ , 这部分光子是含有内部杂质信息的有用光子.  $W_r$  的大小反映内部杂质信息的强弱, 若杂质为理想黑体, 这部分光子完全被吸收. 对于光学反射成像法, 区分介质和杂质的最佳方法是某种色度空间的差异<sup>[20]</sup>. 因此, 可以用传感区域出射的“被吸收的光子总权重”  $W_r$  来表征反射光成像检测层间杂质的效率. 此外, 也可以对比出射光子中是否有通过杂质所在区域的光子权重差来表征. 本文采用前者, 即使用  $W_r$  来表征检测效率. 透射情况类似, 透射传感区域出射的光子中“被吸收的光子总权重”为  $W_t$ .  $W_r$  和  $W_t$  的值越大, 表明系统对该种杂质的检测能力越强.

### 3.3. “光子通过杂质”的判断

当光子在介质内部传输时, 需要判断光子运行

的路径是否通过杂质所在区域, 若通过则置标志位为 1. 杂质所在区域为 ( $x^2 + y^2 = 1, z=t$ ), 如图 1 所示. 图 3 为光子单次散射过程在  $xoz$  平面和  $yoiz$  平面上的投影, 光子初始位置为  $M$ , 发生单次散射后位置为  $N$ .

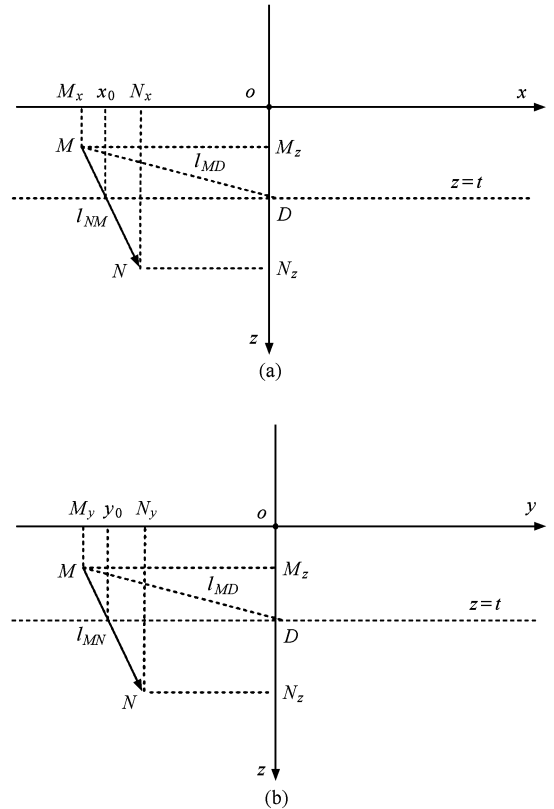


图3 光子散射过程在平面上的显示 (a) $xoz$ 平面, (b) $yoiz$ 平面

判断光子经过该次散射是否通过杂质所在区域的算法由 3 个步骤组成.

**步骤 I** 在  $xoz$  平面内计算光程  $l_{MN}$  与平面  $z=t$  在  $x$  轴的交点  $x_0$ . 计算公式为

$$x_0 = \begin{cases} \frac{N_x + M_x}{2} & (|N_z - M_z| \leq 0.001), \\ \frac{N_x - M_x}{N_z - M_z}(t - M_z) + M_x & (|N_z - M_z| > 0.001). \end{cases} \quad (3)$$

**步骤 II** 在  $yoiz$  平面内计算光程  $l_{MN}$  与平面  $z=t$  在  $y$  轴的交点  $y_0$ . 计算公式为

$$y_0 = \begin{cases} \frac{N_y + M_y}{2} & (|N_z - M_z| \leq 0.001), \\ \frac{N_y - M_y}{N_z - M_z}(t - M_z) + M_y & (|N_z - M_z| > 0.001). \end{cases} \quad (4)$$

**步骤Ⅲ** 判断交点  $x_0, y_0$  是否在  $x^2 + y^2 = 1$  内, 同时保证  $M_z$  和  $N_z$  分别在  $z=t$  两边, 即判断

$$\begin{aligned} x_0^2 + y_0^2 &\leq 1, \\ (M_z - t)(N_z - t) &\leq 0. \end{aligned} \quad (5)$$

如果满足则表示光子此次散射过程通过杂质所在区域. 为增加程序运行速度, 算法在上述判断之前做一次预处理. 首先计算初始位置和杂质中心连线的距离  $l_{MD}$ , 然后判断下列条件:

$$\begin{aligned} (M_z - t)(N_z - t) &\leq 0, \\ |l_{MD} - r| &< l_{MN}. \end{aligned} \quad (6)$$

如果不满足条件(6)式, 则表明光子经过路程  $l_{MN}$  之后

不可能通过杂质所在区域, 否则还需要进一步判断. 计算表明, 添加预处理后算法效率提高了 6.03%.

## 4. 若干因素对杂质检测的影响规律

### 4.1. 入射光强

模拟入射的光子数  $N$  分别从  $10^5$  到  $6 \times 10^5$ , 每隔  $10^5$  进行一次实验, 其他相关参数均使用上述给出的实验参数, 程序运行 18.1 h, 所得结果如图 4 所示, 图中每个点均代表一次实验结果.

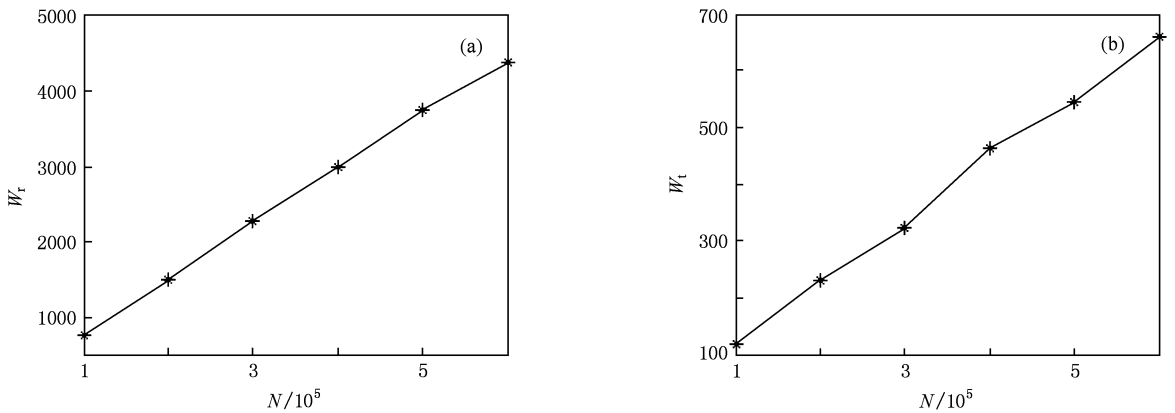


图 4 不同入射光强下杂质的检测效率 (a) 反射光成像, (b) 透射光成像

从图 4 可以看出, 随着入射光强的增加, 反射光和透射光成像(传感区域)的“被吸收的光子总权重”均随之增加, 且均与入射光强呈线性关系. 由于从透射传感面出射的光子数较少, 所以图 4(b) 的线性度低于图 4(a). 不论是反射光还是透射光, 如入射光子数增多, 光子通过杂质的光子数也会随之增多. 因此, 增加入射光强可以提高反射光和透射光成像法的检测效率. 需要注意的是, 当光强超过一

定强度后成像 CCD 会发生饱和, 此时检测效率会下降<sup>[21]</sup>, 因此入射光强应根据实际情况进行调节.

### 4.2. 杂质埋藏深度

模拟杂质埋藏深度  $t$  分别从 0.5 到 5.5 mm, 每隔 0.5 mm 进行一次实验, 其他相关参数均使用上述给出的实验参数, 程序运行 7.5 h, 所得结果如图 5 所示, 图中每个点均代表一次实验结果.

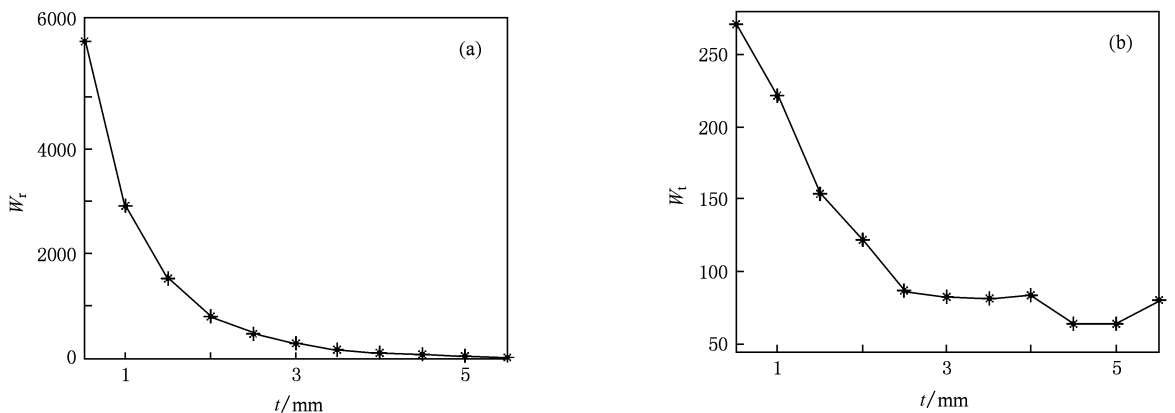


图 5 不同杂质埋藏深度下杂质的检测效率 (a) 反射光成像, (b) 透射光成像

从图 5 可以看出,随着杂质埋藏深度的增加,反射光和透射光成像的“被吸收的光子总权重”均随之减小,且均与杂质埋藏深度呈指数衰减关系. 当埋藏深度超过 3 mm 后,反射光和透射光成像的结果均较差. 杂质的检测结果受埋藏深度的影响较大. 杂质到出射表面间的散射介质散射掉大量有用信息,这是层间杂质不易检测的主要原因. 因此,减小埋藏深度可以提高反射光和透射光成像法的检测效率. 对于厚度为 10 mm 的散射介质,埋藏深度为 5.5 mm 时,  $W_r = 29$ . 如果从另一面检测,相当于杂质的埋藏深度为 4.5 mm,此时得到的  $W_r = 87$ ,检测效率提高了 2 倍. 因此,可以通过透反射双面检测方法减小杂质的相对埋藏深度.

### 4.3. 介质折射率

模拟介质折射率  $n$  分别从 1.2 到 2.2,每隔 0.2 进行一次实验,其他相关参数均使用上述给出的实验参数,程序运行 5.7 h,所得结果如图 6 所示,图中每个点均代表一次实验结果.

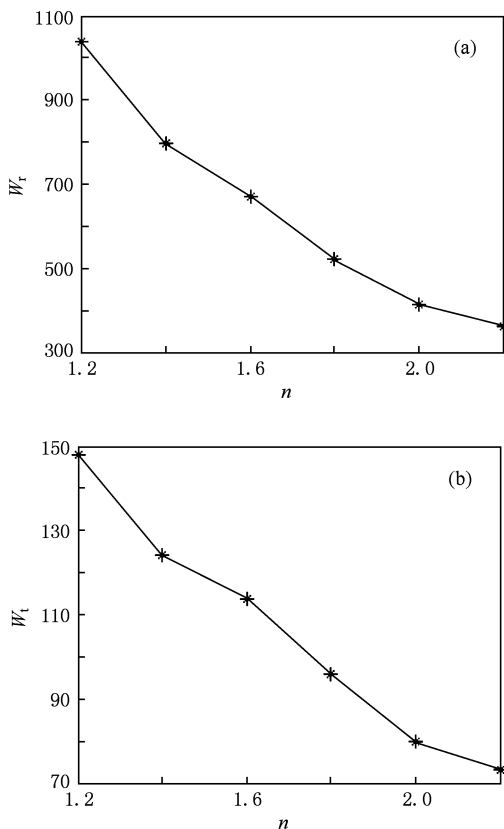


图 6 不同介质折射率下杂质的检测效率 (a) 反射光成像, (b) 透射光成像

从图 6 可以看出,随着介质折射率的增加,反射

光和透射光成像的“被吸收的光子总权重”均随之减小,且均与介质折射率呈近似负线性关系. 当增大介质折射率时,增大了公式(1)得到的外反射系数,因此减小了光子入射到介质中的概率. 同时,增大介质折射率时,减小了公式(2)得到的内反射系数,增大了进入到介质中的光子出射的概率,因而减小了光子与杂质的接触概率,进而降低了检测效率. 因此,减小介质折射率可以提高反射光和透射光成像法的检测效率. 可以通过添加渗透试剂的方法提高介质的通透率<sup>[22]</sup>,在提高介质通透率的同时通常也会减小散射系数. 散射系数对透反射成像检测效率的影响将在下面进行讨论.

### 4.4. 介质散射系数

模拟介质散射系数  $u_s$  分别从 50 到 300  $\text{mm}^{-1}$ ,每隔 50  $\text{mm}^{-1}$  进行一次实验,其他相关参数均使用上述给出的实验参数,程序运行 12.5 h,所得结果如图 7 所示,图中每个点均代表一次实验结果.

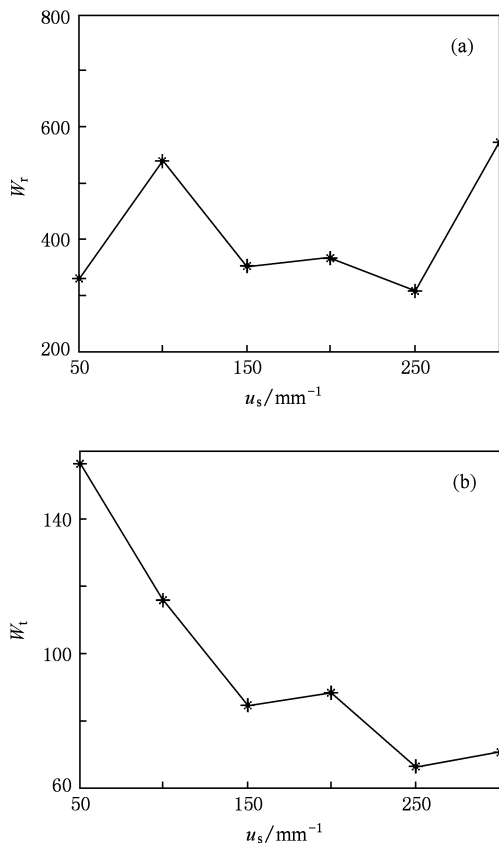


图 7 不同介质散射系数下杂质的检测效率 (a) 反射光成像, (b) 透射光成像

从图 7 可以看出,随着介质散射系数的增加,反

射光成像的“被吸收的光子总权重”几乎没有变化,而透射光成像的“被吸收的光子总权重”随之减小,且与介质散射系数呈指数衰减关系.因而,散射系数的变化对反射光成像的检测结果几乎没有影响,但对于透射光成像检测有较大影响.因此,减小散射系数可以提高透射光成像法的检测效率.添加某些渗透试剂可以在减小介质折射率的同时也减小散射系数,因此可以提高检测效率.

#### 4.5. 介质各向异性因子

模拟介质各向异性因子  $g$  分别从 0.45 到 0.95,每隔 0.1 进行一次实验,其他相关参数均使用上述给出的实验参数,程序运行 7.5 h,所得结果如图 8 所示,图中每个点均代表一次实验结果.

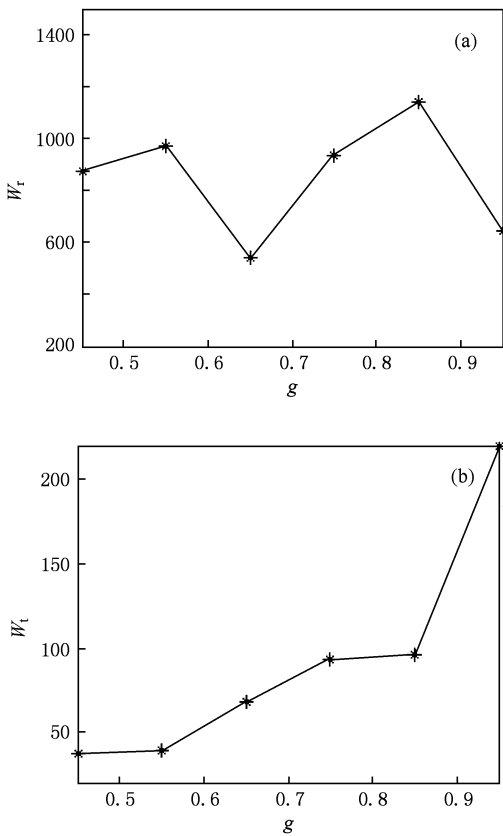


图 8 不同各向异性因子下杂质的检测效率 (a) 反射光成像, (b) 透射光成像

从图 8 可以看出,随着介质各向异性因子  $g$  的增加,反射光成像的“被吸收的光子总权重”几乎没有变化,而透射光成像的“被吸收的光子总权重”随之增大,且与各向异性因子呈指数增长关系.因而介质的取向度对反射光成像的检测结果几乎没有影响,但对于透射光成像的检测结果有较大影响.

因此,增大各向异性因子可以提高透射光成像法的检测效率.可以通过改变物质取向度提高各向异性因子,介质沿  $z$  轴的取向度越高,越有利于利用透射光成像法检测杂质.

#### 4.6. 影响规律及讨论

综合上述实验结果及分析,得到若干成像参数对杂质检测效率的影响规律如表 1 所列.

表 1 若干因素对杂质检测效率的影响规律

| 影响因素     | 反射光成像  | 透射光成像  |
|----------|--------|--------|
| 入射光强     | 线性上升   | 线性上升   |
| 杂质埋藏深度   | 指数下降   | 指数下降   |
| 介质折射率    | 近似线性下降 | 近似线性下降 |
| 介质散射系数   | 近似无关   | 指数下降   |
| 介质各向异性因子 | 近似无关   | 指数上升   |

从表 1 可知,入射光强、杂质埋藏深度和介质折射率对反射光和透射光成像均有较大影响,而且影响规律相似.为提高反射光成像检测杂质的效率,可以采取的方法有增加入射光强、减小杂质埋藏深度或减小介质折射率.成像 CCD 未饱和之前可以通过增大入射光强提高检测效率.添加某些渗透试剂提高介质的通透率,既可减小介质折射率又可减小散射系数,因此也可以提高检测效率.透反射双面检测可以减小杂质的相对埋藏深度,进而提高检测效率.

为提高透射光成像检测杂质的效率,可以采取的方法有增加入射光强、减小杂质埋藏深度、减小介质折射率、减小介质散射系数或增大各向异性因子.除了采用这些与提高反射光成像法检测效率相同的措施之外,还可以通过提高介质的取向度来提高透射光成像法的检测效率.

除了上述考虑的因素之外,不同光源波长对检测结果也会产生一定影响.本文假设杂质为理想黑体,而一般物质都有特异的吸收光谱,对比杂质和介质光谱吸收差异可以得到最优检测波长<sup>[23]</sup>.此外,光偏振态也可能会对结果产生影响.一般情况下,光进入散射介质内部若干毫米便失去了偏振和相干特性<sup>[24]</sup>,如果杂质有偏振特性,那么使用偏振光也可以取得一定效果<sup>[25]</sup>.

## 5. 结 论

改进现有的 Monte Carlo 算法,得到若干因素对

透反射成像检测杂质的影响规律, 这些规律对散射体中层间杂质检测具有一定的指导意义.

入射光强、杂质埋藏深度和介质折射率对反射光和透射光成像检测结果均有一定影响, 而且影响规律相似. 反射光和透射光成像的检测效率均随入射光强的增加而呈线性增加; 随杂质埋藏深度的增加而呈指数衰减; 随介质折射率的增加而近似线性衰减.

介质散射系数和各向异性因子对反射光成像

检测结果几乎没有影响, 但对透射光成像检测结果有一定影响. 透射光成像的检测效率随介质散射系数的增加而呈指数衰减; 随各向异性因子的增加而呈指数增加.

增加入射光强、减小杂质埋藏深度或减小介质折射率均可以提高反射光成像的检测效率. 增加入射光强、减小杂质埋藏深度、减小介质折射率、减小介质散射系数或增大各向异性因子均可以提高透射光成像的检测效率.

- 
- [1] Canpolat M, Akyuz M, Gokhan G A, Gurer E I, Tuncer R 2009 *J. Biomed. Opt.* **14** 054021
- [2] Doxaran D, Babin M, Leymarie E 2007 *Opt. Express* **15** 12834
- [3] Jia D Y, Ding T H 2005 *Opt. Eng.* **44** 076402
- [4] Chandrasekhar S 1950 *Radiative Transfer* (Oxford: Clarendon Press) p37
- [5] Gate L F 1974 *Appl. Opt.* **13** 236
- [6] Contini D, Martelli F, Zaccanti G 1997 *Appl. Opt.* **36** 4587
- [7] Xu T, Zhang C P, Tian J G, Song F, Wang X Y, Zhao C M 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1660
- [8] Kim A D, Ishimaru A 1998 *Appl. Opt.* **37** 5313
- [9] Li J P, Chen B Q 2005 *J. Appl. Opt.* **26** 20 (in Chinese) [李剑平、陈冰泉 2005 *应用光学* **26** 20]
- [10] Wilson B C, Adam G 1983 *Med. Phys.* **10** 824
- [11] Yun T, Zeng N, Li W 2009 *Opt. Express* **17** 16590
- [12] Xu T, Zhang C P, Chen G Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 1813
- [13] Huang Y, Liang X G, Xia X L 2005 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **92** 111
- [14] Pery E, Guillemain F 2009 *J. Biomed. Opt.* **14** 024048
- [15] Henyey L G, Greenstein J L 1941 *J. Astro. Phys.* **93** 70
- [16] Peters V G, Wyman D R 1990 *Phys. Med. Biol.* **35** 1317
- [17] Cheong W F, Prah S A, Welch A J 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 2166
- [18] Wang L, Jacques S L, Zheng L 1995 *Comput. Meth. Prog. Biol.* **47** 131
- [19] Wang J G, Wang G Y, Xu Z Z 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 530
- [20] Jia D Y, Ding T H 2006 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Tech. Ed.)* **46** 176 (in Chinese) [郑东耀、丁天怀 2006 *清华大学学报 (自然科学版)* **46** 176]
- [21] Jia D Y, Ding T H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4058 (in Chinese) [郑东耀、丁天怀 2005 *物理学报* **54** 4058]
- [22] Yeh A T, Hirshburg J 2006 *J. Biomed. Opt.* **11** 014003
- [23] Jia D Y, Ding T H 2005 *Meas. Sci. Tech.* **16** 1355
- [24] Xu L Q, Li H, Xiao Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6030 (in Chinese) [徐兰青、李 晖、肖郑颖 2008 *物理学报* **57** 6030]
- [25] Mu T K, Zhang C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 060702

# Influential factors and analysis of detecting buried trash in scattering media<sup>\*</sup>

Zhou Fei Ding Tian-Huai<sup>†</sup>

(*Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 26 March 2010; revised manuscript received 20 July 2010)

## Abstract

Detection of buried trash in scattering media is a very important research project. Detection efficiency is influenced by several imaging parameters, such as incident light intensity, trash buried depth, medium refractivity, medium scattering coefficient and medium anisotropic factor. Firstly, current Monte Carlo algorithm is revised. Secondly, influential laws of those parameters are researched by simulating a great number of photons propagating in a scattering medium. The results indicate that light intensity, trash buried depth and medium refractivity greatly affect both reflection and transmission imaging results; and their influential laws are similar. Detection efficiency of reflection imaging can be improved by increasing light intensity, reducing trash buried depth or medium refractivity. Detection efficiency of transmission imaging can be improved by increasing light intensity, reducing medium refractivity and scattering coefficient, or increasing anisotropic factor. These conclusions have universal significance of guidance in the detection of buried trash in scattering media.

**Keywords:** scattering media, buried trash, Monte Carlo algorithm, reflection and transmission imaging

**PACC:** 0760, 8760, 4225F

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Key Science and Technology Program of Jiangsu Province, China (Grant No. BE2007056).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: dlunj@tsinghua.edu.cn