



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 19077.1—2003

---

## 粒度分析 激光衍射法

Particle size analysis—Laser diffraction method

(ISO 13320-1:1999, Particle size analysis—Laser diffraction methods—  
Part 1: General principles, MOD)

2003-04-15 发布

2003-09-01 实施

---



中华人民共和国  
国家质量监督检验检疫总局 发布

## 前 言

本部分修改采用 ISO 13320-1:1999《粒度分析 激光衍射法 第 1 部分:总则》。

本部分与 ISO 13320-1:1999 的主要差异是作了编辑性修改。

本部分的附录 A 至附录 D 是资料性附录。

本部分由中国有色金属工业协会提出。

本部分由全国有色金属标准化技术委员会归口。

本部分起草单位:中南大学粉末冶金研究所。

本部分主要起草人:廖寄乔、王 华、陈 亮、张宪铭。

## ISO 前言

国际标准化组织(ISO)是各国家标准化团体(ISO 成员团体)的一个世界范围的联盟。国际标准的制定工作通常是通过 ISO 的技术委员会进行的,对某个已成立了技术委员会的专业领域感兴趣的成员团体都有权参加该委员会。与 ISO 有联络的官方和非官方的国际组织也参与这项工作。ISO 在有关电工技术标准化方面与国际电工委员会(IEC)紧密合作。

本国际标准是根据 ISO/IEC 导则第 3 部分所作的规定起草的。

委员会所采纳的国际标准草案需分发给各成员团体投票表决,作为国际标准发布时要求至少 75% 的成员团体投票批准。

国际标准 ISO 13320-1 是由技术委员会 ISO/TC 24/ SC 4(筛子,筛分和其他粒度测试方法)制定的。本国际标准所涉及的方法为非筛分法。

ISO 13320 在总标题“粒度分析——激光衍射法”下包括以下部分:

——第 1 部分:基本原理

——第 2 部分:转换过程的有效性

附录 A 至 D 为资料性附录。

## 引 言

现在,利用激光衍射技术的粒度测量方法在许多不同领域得到广泛应用。这项技术的成功基于这样的事实:它能应用于各种颗粒系统中且速度快、能自动化操作,可使用许多商用设备。但是,设备的正确使用、结果的正确分析都需小心谨慎。

因而,有必要针对运用激光衍射技术分析颗粒粒度制定一个标准,其目的是为粒度分析在质量控制方面提供方法。

最初,激光衍射技术开始于小角散射,因此,这一技术还有如下名称:

- 夫琅和费(Fraunhofer)衍射法;
- (近似的)正向光线散射法;
- 小角度激光散射法(LALLS)。

但是,这一技术范围已扩大,包括更大角度范围内的光散射,除了采用近似理论如夫琅和费衍射和不规则衍射外,还应用米氏(Mie)理论。

激光衍射技术基于以下现象:粒子在各个方向产生散射光而形成的光强度图取决于粒子大小。现有设备假定粒子的形状是球形的。图1显示了单个粒子散射谱的特征:高低强度交替变化,进而显示小颗粒散射角度比大颗粒的宽。



图1 两种球形粒子的散射图(a 颗粒粒径为 b 颗粒的 2 倍)

在一定限度内,系列粒子的散射图形等同于各个粒子散射图形的叠加。通过运用数学叠合法程序使用光学模型计算单位体积颗粒在所选粒度区间的散射图,就可计算出颗粒的体积粒度分布。这一散射图形最接近于所测出的图形(也可参见附录 A)。

典型的激光衍射装置包括:光源(通常为激光)、颗粒分散装置、测量散射谱的探测器和一台用于控制设备和计算颗粒粒度分布的计算机。需要注意的是,激光衍射技术不能分辨单颗粒和由单颗粒聚集成的团粒这两者产生的散射。通常,团粒的最终颗粒粒度与堆集尺寸有关,但有时颗粒粒度分布也能反映出单个颗粒的粒度。由于大多数颗粒样品中含有团粒或凝聚,而人们通常感兴趣的是原始颗粒的粒度分布。因此常在测量前将试样分散成原始颗粒。

以前,设备只能用于角度小于 $14^\circ$ 的散射,这就不能应用于测量尺寸约为 $1\ \mu\text{m}$ 的小颗粒。受到这样限制的原因是:颗粒越小,在大角度的散射越明显(从附录 A 也可看出这一点)。现在许多设备能在更大的散射角进行测量,有的可达到 $150^\circ$ ,这主要是通过应用如更短波长光源、更多更大的透镜和使用两束激光或更大面积及适当数量的探测器。因此,测量下限可到 $0.1\ \mu\text{m}$ ,有些设备测量下限可到 $0.02\ \mu\text{m}$ 。

# 粒度分析 激光衍射法

## 1 范围

本部分通过分析颗粒的角度光散射图,对测量任意双相系的颗粒粒度分布提供指导,这些双相系包括:粉末体、水雾、烟雾剂、悬浮液、乳状液以及液体中的气泡等。本标准不针对特定产品的粒度大小测量提出具体要求,可用于测量粒度范围在  $0.1\ \mu\text{m}\sim 3\ \text{mm}$  的颗粒。

对于非球形颗粒,由于这一技术假定其光学模型中的颗粒为球形,因此可以获得等效球形粒度分布。这一粒度分布结果可能与基于其他物理原理的测量方法所得结果有所不同(如沉降法、筛分法)。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本部分引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

ISO 9276-1:1990 粒度分析结果的表示 第1部分:图示法

## 3 定义和符号

以下的定义和符号适用于本标准。

### 3.1 定义

#### 3.1.1

**吸收 absorption**

光束在媒介中传播时,由于能量转换而导致的光束强度消减。

#### 3.1.2

**变异系数 coefficient of variation**

相对测量精度(%):标准偏差除以总体平均值乘以 100(对于标准正态分布,中位值等于平均值)。

#### 3.1.3

**复合折射率  $N_p$  complex refractive index**

一个颗粒的折射率,由实部和虚(吸收)部组成:

$$N_p = n_p - ik_p$$

#### 3.1.4

**相对折射率  $m$  relative refractive index**

颗粒复合折射率与介质折射率之比:

$$m = N_p/n_m$$

#### 3.1.5

**重叠合法 deconvolution**

通过测量散射图而得出全部颗粒粒度分布的数学程序。

#### 3.1.6

**衍射 diffraction**

光在传播时碰到颗粒阻碍而偏离直线,绕着颗粒轮廓传播,超出其几何阴影区的物理现象。

#### 3.1.7

**消光 extinction**

在媒介中传播的光由于被吸收和散射而发生衰减的现象。

3.1.8

**模型矩阵 model matrix**

矩阵中包含不同粒度区间的单位体积的光散射矢量，与探测器的几何形状成比例，从模型计算中得出。

3.1.9

**多元散射 multiple scattering**

多个颗粒的光散射图，它不再是单个颗粒散射图的总和(与单元散射相比)。

3.1.10

**浊度/试样光学浓度 obscuration/optical concentration**

由于颗粒的消光(散射或吸收)而衰减的入射光的百分率。

3.1.11

**光学模型 optical model**

用于计算模型矩阵中光学均匀球体的理论模型。根据需要常配有某一特定组合的复合折射率，例如夫琅和费(Fraunhofer)衍射，不规则衍射，米氏(Mie)散射。

3.1.12

**反射 reflection**

通过表面使光线返回，不改变光的波长。

3.1.13

**折射 refraction**

光从一种介质进入另一种介质中，传播方向发生了改变，从而改变了光传播的速度；遵守斯涅耳折射定律： $n_m \sin \theta_m = n_p \sin \theta_p$ 。

3.1.14

**散射 scattering**

描述光在两种介质界面间改变传播方向现象的通用术语。

3.1.15

**散射图 scattering pattern**

因散射而产生的与角度或空间位置有关的光强图(分别为  $I(\theta)$  和  $I(r)$ )，或者是考虑了探测元件的灵敏度和几何形状的相关能量值。

3.1.16

**单元散射 single scattering**

单个颗粒对总体散射图的贡献，它完全独立于其他颗粒。

3.1.17

**正态粒度分布的宽度 width of normal size distribution**

粒度分布的标准偏差(绝对值)或者变异系数(相对百分比)。

注：对于正态分布，95%左右的颗粒落在平均值的±2倍标准偏差之内，或者99.7%左右的颗粒落在平均值的±3倍标准偏差之内。

3.2 符号

$c$  颗粒体积分数，%；

$f$  透镜的焦距，mm；

$I(\theta)$  颗粒光散射(散射图)的角强度分布；

$I(r)$  探测元件上(通过探测器测量散射图)颗粒光散射的空间强度分布；

$i$  表示折射率的虚数部分；

$i_n$  探测元件  $n$  的光电流,  $\mu\text{A}$ ;

$k$  波数,  $2\pi/\lambda$ ;

$k_p$  颗粒折射率的虚数(吸收)部分;

$l$  包含颗粒的光照路长度,  $\text{mm}$ ;

$L$  光电流的矢量( $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ );

$m$  颗粒对介质的相对综合折射率;

$n_m$  介质折射率的实部;

$n_p$  颗粒折射率的实部;

$N_p$  颗粒的复合折射率;

$r$  从焦点到焦面的径向距离,  $\mu\text{m}$ ;

$v$  颗粒在干式分散器中的速度;

$x$  颗粒直径,  $\mu\text{m}$ ;

$x_{50}$  颗粒的中位径,  $\mu\text{m}$ ; 为体积基准, 即 50% 体积的颗粒直径小于这个值, 另 50% 体积的颗粒直径大于这个值;

$x_{10}$  表示在累积粒度分布曲线中, 10% 体积的颗粒直径比此值小,  $\mu\text{m}$ ;

$x_{90}$  表示在累积粒度分布曲线中, 90% 体积的颗粒直径比此值小,  $\mu\text{m}$ ;

$\alpha$  无量纲粒度参数,  $\pi x/\lambda$ ;

$\theta$  相对于入射方向的散射角度;

$\theta_m$  光线在介质中相对于介质边界垂直方向的角度(见斯涅耳定律, 参见折射);

$\theta_p$  光线在颗粒中相对于颗粒边界垂直方向的角度(见斯涅耳定律, 参见折射);

$\lambda$  介质中(液体或气体/空气)光源的波长,  $\text{nm}$ ;

$\omega$  在干式分散器中颗粒的旋转速度。

#### 4 原理

一个有代表性的试样, 在装有适当液体或气体的容器中分散成适当浓度, 然后使其通过单色光束(通常是激光), 光遇到颗粒后以各种角度散射, 由多元探测器测量这些光束, 并且记录散射图上相应的数值用于随后的分析。然后通过适当的光学模型和数学程序转化记录下来的散射光数据, 计算某一粒度颗粒相对于总体积的百分比, 从而得出粒度体积分布。

#### 5 激光衍射装置

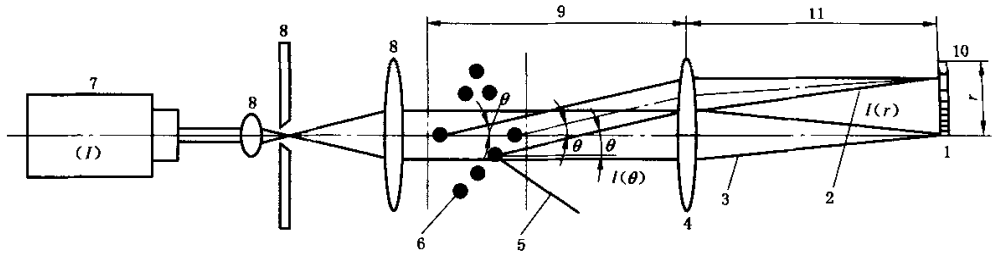
图 2 中描述了一个典型的激光衍射装置。在常规衍射装置中, 光源(通常都是激光)用来产生单色的、相干的和平行的光束, 随后是光束处理单元, 通常是带有积分过滤器的一个光束放大器, 产生一束扩展的近乎理想状态的光束来照射分散的颗粒。

一个有代表性的试样, 分散成足够浓度, 与传输介质(液体或气体)一起通过测量光束区, 这个测量区域应在透镜的有效工作距离之内。有时, 颗粒流被激光束直接照射测量, 诸如液体制剂、喷雾剂以及液体中的气泡。在另外的情况下, 诸如乳状液, 糊状体和粉末体等典型的试样, 能够在合适的液体中分散(见附录 C)。通常用分散剂(润湿剂)和/或机械外力(搅拌超声波)来分散团粒以及稳定分散效果, 对于这些液体分散剂, 普遍使用循环系统, 它有一个光学测量系统, 分散器上通常装配搅拌器、超声波元件、泵和导管。

通过干粉分散装置(干式分样器), 干粉末转变成悬浮状态, 在这过程中机械力用来分散团粒, 同时采用了一个能给分散器定量输送试样的喂料装置。分散装置使用压缩气体的能量或压差能量来分散颗粒, 形成悬浮颗粒, 通过测量区, 悬浮颗粒然后被送进收集颗粒的真空管道的入口。

有两种方式使颗粒进入激光束。一种是在通常情况下, 让颗粒在收集透镜(即傅立叶透镜)前面的

某一段有效工作范围之内进入平行光束(见图 3a)。在所谓的反傅立叶光学系统中,颗粒在收集透镜之后进入会聚光束光路(见图 3b)。



- 1——浊度探测器;
- 2——被散射光;
- 3——直射光;
- 4——傅立叶透镜;
- 5——未被透镜 4 收集的散射光;
- 6——粒子;
- 7——激光源;
- 8——光束处理单元;
- 9——透镜 4 的工作距离;
- 10——多元探测器;
- 11——透镜 4 的焦距。

图 2 激光衍射装置示例

传统测量装置(傅立叶光路)的优点是,在透镜工作距离之内允许样品室有一个较宽的路径长度。第二种装置(反傅立叶光路)对样品室的路径长度有一定限制,但能测量到大角度方向的散射光,这对于亚微米颗粒是非常有用的。反傅立叶光路主要用于湿法测量,但若通过透镜的焦距合理设计样品池及光路,也可用于干法测量。

入射光束和颗粒的相互作用就形成了不同角度下不同光强的散射图(见附录 A)。由直射光和散射光组成的光强角度分布  $I(\theta)$ ,被一个正像透镜或一个透镜组聚焦到多元探测器上。透镜(或透镜组)就会形成一个散射图,在限定范围内散射图形状不依赖于光束中的颗粒位置。因此,连续的光强角度分布  $I(\theta)$ 在多元探测器上就被转变成一个连续的空间光强分布  $I(r)$ 。

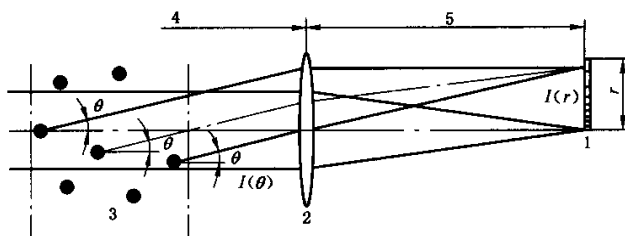
记录的颗粒系统散射图与所有随机相对位置上单个颗粒的散射图的总和是相同的。注意:仅仅在有限的光散射角度范围内的散射光被透镜收集到,同样,这些光才可被探测器探测到。

探测器一般是由大量的光电二极管组成,一些仪器使用一个光电二极管与移动狭缝相连接。光电二极管将空间的光强分布  $I(r)$ 转变成一系列光电流  $i_n$ ,随后电子元件将光电流转化成一系列强度或能量矢量  $L_n$ ,并使之数字化,其就代表散射图,中央元件用来测量非散射光的强度。通过计算,进行光学浓度的测量。一些仪器提供一种特殊几何形状的中央元件,以便通过移动探测器或透镜来进行探测器中心定位和再聚焦。必须固定探测器的位置以防止来自于表面的反射光再进入光学系统。

计算机用来控制测量及储存和控制探测信号,储存和/或计算适当形式的光学模型(通常为一个矩阵模型,它包含单位粒度的单位体积的光散射矢量,与探测器的几何形状和灵敏度成比例)及计算颗粒粒度分布(见附录 A),同时计算机也可以用来自动控制仪器。

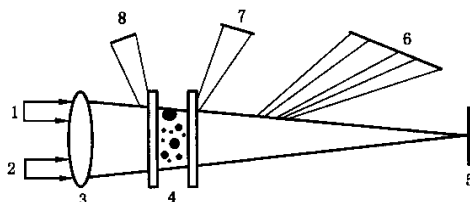
由于仪器的生产厂家不同或者同一个公司的型号不同,这就使仪器硬件和软件上存在着一些重大的差别。具体的仪器都应该有足够正确区别这些差别的信息,在附录 B 的介绍中,就提供了激光衍射仪的详细说明。





- 1—探测器；
- 2—前沿透镜；
- 3—粒子团；
- 4—工作距离；
- 5—焦距。

a) 傅立叶光路：颗粒在透镜之前并在其工作距离之内的平行光束里



- 1—光束 1；
- 2—光束 2；
- 3—反傅立叶透镜；
- 4—试样池；
- 5—探测器阵列 1；
- 6—探测器阵列 2；
- 7—探测器阵列 3；
- 8—背散射探测器阵列。

b) 反傅立叶光路：颗粒位于透镜与探测器之间的会聚光束里

图 3 激光衍射装置示例

## 6 操作步骤

### 6.1 准备工作

#### 6.1.1 仪器安装

仪器应该放在一个干净的环境中，并且此环境避免过多电干扰和机械振动，以及温度变动和直接光照。操作区应是通风的，仪器应有一个刚性光学平台，或者应放在一个固定的桌子或凳子上，以避免光学系统频繁的对光调整。

**警告：**仪器发射系统配备一个低电压激光源，它能导致眼睛永久的伤害，不要去看激光束的直射光或者它的反射光。避免用反射面切断激光束。必须了解当地激光发射器的安全指南。

#### 6.1.2 分散液体

任何一种已知折射率的光学透明液体都可以使用。这样，许多液体都可作为粉末的液体分散剂。附录 C 介绍了对分散液的要求。

如果一种有机液体用作分散剂，那么要遵守当地健康和安规章。当使用高蒸汽压的液体时应使用槽盖，以防止在超声波浴上方形成危险的蒸气聚集和/或在流体中由于蒸发产生低温区而导致折射率的波动。

#### 6.1.3 分散气体

对于干分散剂和喷雾容器,有时使用压缩气体,它必须不含油、水和微粒。为此,应使用一个带过滤器的干燥器,任何真空单元都应与测量区隔离开,以便输出的热空气不会影响到测量区。应防风,以免干扰颗粒流的稳定。

6.2 试样检查、准备、分散和试样浓度

6.2.1 试样检查

用目视或借助显微镜检查要分析的试样,首先估计试样的粒度范围和颗粒形状,然后,检查颗粒是否已充分分散。

如果所分析的试样对于材料某一批具有代表性并已被充分分散,则其所测得的粒度分布结果仅对所代表的那一批试样有效。

6.2.2 试样准备

对于干粉末,通过适当分样技术(例如旋转分样技术),来制备一个具有代表性的和体积合适的试样以备测量。如果需要非常少量的试样或者在湿粉末情况下,可从混合得非常好的试样膏剂中取得部分试样。膏剂可避免取样出错。膏剂是在混合时用一个平勺逐滴向试样中滴加分散剂而形成的。只要混合物形成块状物,就应一滴一滴增加分散剂,并且加入每滴后都要继续混合。膏剂的最好样式就像蜂蜜或牙膏。如果由于出错而使混合料变稀,那么它就不能使用,须重新制作。

如果最大粒度超过了测量范围,那么须预先除去原料中太粗的颗粒。例如预先筛分,在这种情况下须确定并记录除去的数量或百分比。

由于对水雾、烟雾剂、液体中的气泡想通过取样或稀释而不改变其颗粒粒度分布几乎不太可能,因此只要它们浓度适当(见 6.2.3 和 6.2.4),就应对它们直接测量。

6.2.3 试样分散

6.2.3.1 干粉末可在空气或液体中分散。分散过程应符合测量目的,比如必须确定是否测定团粒或把团粒破碎成初始颗粒。

6.2.3.2 应使用一个合适的干分散器;一般使用压缩空气或真空作为分散剂,它们通过剪应力和颗粒与颗粒之间或颗粒与器壁之间的机械分散力相结合(见图 4)。对于干分散,应测量具有代表性的试样,注意试样数量要足够多,这样能在一个较宽的粒度分布范围内测量,从而克服粗颗粒较差的统计代表性。既要做到单个颗粒不要被破碎,又要使整个试样分散良好。通常用于分散剂与用液体分散剂相比较,在理想情况下的结果应是一致的。另外一种方法就是通过改变分散能量(例如初始空气压力)来显示粒度分布的变化,检查分散和破碎的程度。通常开始时随着分散能的增大,分散程度提高,细粉的数量增多,当到达稳定态时,粒度分布将不随能量增高而变。继续增大扩散能时,由于颗粒的破碎而使细粉的数量重新增加。在某些场合,以高流速通过一个台阶时,也能发现成团现象。稳定平台的中心表明有最佳分散能,但是要注意,这种稳定态并不经常被发现(例如对于那些高度团聚或者易碎的颗粒)。

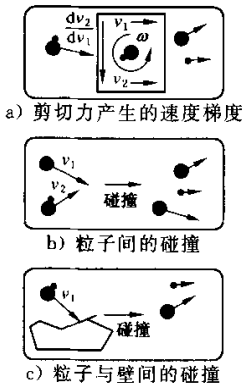


图 4 粉末干分散过程

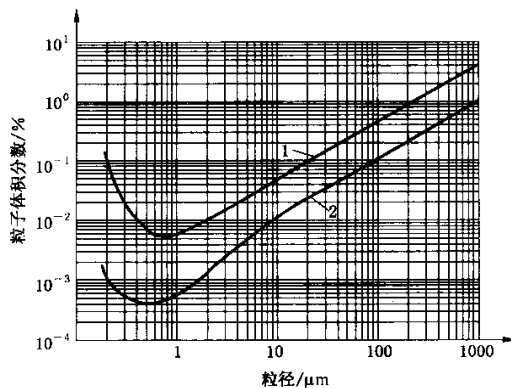
6.2.3.3 对于液体分散剂的准备,一系列液体都可应用。附录 C 提出了一些要求和建议。一般而言,制成膏剂、搅拌和超声波都很容易使液体中的颗粒很好分散。第一步通过视觉(或显微镜)检查悬浮液的分散情况,也可直接在激光衍射仪器中对悬浮液进行测量,测量时伴随适当的超声波振动。如果试样充分分散并且颗粒不易碎或不可溶,测量的粒度分布应没有太大变化。

为了测量的可重现性,试样的最小体积应随着粒度范围的增宽而增加,以便足够数量的大颗粒不被漏掉。因此,若超出试样光学浓度,需要增加悬浮这些试样的液体的体积。

例如,试样的粒度范围大约在  $2\ \mu\text{m}\sim 200\ \mu\text{m}$ ,则需要至少 500 mL 悬浮剂来分散至少 0.3 mL 试样。并且在一次测量过程中测量时间或者探测器读出的数据应足以保证测量的精确度。适当的测量条件应根据实验需求的测量精度建立。

#### 6.2.4 试样浓度

在分散剂中的颗粒浓度应大于某一最小值。对于许多仪器,为了在探测器中得到一个可接受的信噪比,至少要 5% 体积分数。同样它也应有浓度上限,为了避免多元散射(光接连被多个颗粒散射),对那些大于  $20\ \mu\text{m}$  的颗粒,浓度上限约为 35%。基于同样的理由,对于小于  $20\ \mu\text{m}$  的颗粒,其浓度值应保持在 15% 以下。一般来说,多元散射在较大散射角时出现。若没有多元散射校正,细粉的计算数量将超过真实值。如果一定要在高浓度下工作的话,应纠正多元散射带来的误差,否则将会出现系统误差。图 5 中提供了初步估计的浓度。



- 1——上限;  
2——下限。

图 5 激光衍射系统中对于窄范围分布的典型粒子浓度上下限与粒子大小的函数  
〔测量路径 2 mm(对数横坐标与纵坐标)〕

图 5 虽仅作为一个例子,但是说明最佳浓度与颗粒粒度是有一定比例的。对于较小颗粒,需要较低的浓度。例如,在带有 2 mm 测量路径的镜头内,直径约为  $1\ \mu\text{m}$  的颗粒,需要的测量浓度约为 0.002%;然而对于颗粒直径为  $100\ \mu\text{m}$  的颗粒则需要大约 0.2% 的浓度。因此,颗粒粒度的分布宽度影响最佳的试样测量浓度。而且,如图 5 所示的浓度范围,受到来自激光束宽度、测量区的路径长度、颗粒的光学特性和探测器单元的精度的影响。

基于以上观点,对于任何典型试样的原料,为了确定其颗粒最佳浓度范围,应在不同颗粒浓度下进行多次测量。

### 6.3 测量

#### 6.3.1 程序

一个典型的通过激光衍射来测定颗粒粒度分布的测量由以下几步构成:

- a) 打开仪器,建立空白测量值

在选择一个合适的颗粒粒度范围和光学部分正确对光之后,对无颗粒的介质进行空白值测量,这些信号值被储存下来,在其后的试样测量过程中,这些空白值被从试样获得的数据中去掉而得到纯试样测

量的信号值。

#### b) 分散试样散射图的测量

大体上,每次测量时间允许在很短的时间间隔内完成多次探测扫描,典型的用 2 s 进行 1 000 次扫描。对于每一个探测单元,都可计算出一个平均信号值,有时还给出标准偏差。数据储存在计算机存储器中。每个探测器元件上的信号强度取决于探测面积、光的强度及其转化成电信号的效率。探测元件的调平座(大小和位置)和透镜的焦距决定着各元件的散射角范围。一般来说,所有这些因素都由设计厂家决定并存储在计算机中。

大多数仪器也测量中心激光束的强度。分散试样和空白实验之间的差别作为浓度值给出,这个值就表示了散射光总量和颗粒浓度。

#### c) 合适光学模型的选择

最常使用的是夫琅和费理论或者米氏理论。

有时用其他一些近似理论来进行散射矩阵的计算。当用米氏理论时,颗粒和介质的折射率或它们的比率都应输入仪器,用它们来进行矩阵模型的计算(见附录 D)。选取折射率的虚数部分的较小值(0.01i~0.1i)用来克服颗粒表面粗糙所带来的影响。

注:若假定的复合折射率有微小差别,则会导致颗粒粒度分布的显著差异。

为了得到真实且可追溯的结果,必须知道所使用的折射率值。

#### d) 将散射图转变成颗粒粒度分布

对于一个给定的颗粒粒度分布,重叠合法的步骤是进行散射图的反向计算。事实上,测量数据总含有一些随机的和系统的误差,可导致错误的粒度分布结果。不同的仪器采用不尽相同的数学处理程序,它们包含了衍射图的实测值与计算值间的权偏差(例如,最小平方)、一些约束条件(例如,颗粒数量必须是正的)和/或粒度分布曲线平滑化。某些程序用观察到的探测信号的变化来进行这些数据的适当加权 and 计算颗粒粒度分布的可信度区间。

### 6.3.2 注意事项

在开始测量前和测量中的任何时候,都应遵守说明书上给出的相关说明。下面的事项应引起重视:

- a) 在打开仪器电源前要明确所有系统的元件都已正确安装。所有颗粒分散装置和传输装置(诸如超声波浴、分散器、真空入口和真空室)都应接地,以防止由于静电反应引起有机溶剂或灰尘爆炸。
- b) 打开电源后,应给予充足时间使仪器稳定。气体激光(诸如 He-Ne 激光)通常都要半个多小时以上的预热时间。
- c) 检查仪器状况。如果需要的话,确定需要的测量范围和透镜。通过观察探测器的强度,确定探测器已对中并位于透镜的焦点位置。没有颗粒时,在仪器的某一安装方式和分散装置下的背景讯号应该在特定范围之下。如果不是这种情况,必要的话要检查和清洗光学元件以确保仪器正常运转。
- d) 确定颗粒通过激光束时是在透镜的特定工作距离之内,以使所有颗粒的相关散射光线能射到透镜,再聚焦到探测器上成像(这样避免了渐晕效应)。
- e) 用已知粒度分布的标准试样在规定的时间内对仪器进行校准,使仪器的精确性和准确性都符合要求(参见 6.4 和 6.5.2)。
- f) 如果是湿式分散,则要检查分散剂中无空气泡。应避免使用泡沫洗涤剂。
- g) 如果为干式分散,通过视觉或随后浓度值的检查,分散器剂量装置应产生稳定的物质流。
- h) 对于烟雾和水雾,决不允许有日光直接地或经由颗粒散射进入探测器,并且颗粒或液滴的流动应是均匀的。
- i) 如果可能的话,检查光学模型对颗粒粒度分布的影响(相对折射率),尤其对有大部分粒子直径小于 10  $\mu\text{m}$  的试样来说更应如此。

注：折射率产生轻微的不同会导致系统错误(见附录 A 和附录 D)。

#### 6.4 重现性

对于粒度分布变异系数等于或小于约 50% (或者颗粒最大直径与最小直径之比为 10:1) 的试样和对于那些来自同一批原料的五个不同试样在仪器的适当范围进行了五次测量的情况, 特征颗粒的粒度重现性应如下: 对于任意粒度分布的中位径值( $x_{50}$ ), 它的变异系数应小于 3%, 位于粒度分布两边的值, 例如:  $x_{10}$  和  $x_{90}$ , 应有一个不超过 5% 的变异系数; 对于 10  $\mu\text{m}$  以下的颗粒, 其最大变异系数值应加倍。

#### 6.5 准确性

##### 6.5.1 校准

考虑到颗粒的理想性能, 激光衍射系统是建立在激光衍射法的基本原理上的(见附录 A), 因而不需要进行严格校准, 但仍必须通过有效的程序证实仪器的正确操作(见 6.5.2)。

##### 6.5.2 确认

6.5.2.1 通过任何有证的或标准参考物质完成主要的标定, 这也是最终用户所能接受的。要检查整个测量程序, 包括取样、试样分散、通过测量区的试样输送、测量和重叠合法程序。有必要对整个操作程序进行充分详细的描述。

需要已知粒度分布的有证或标准参考物质, 其球形颗粒拥有超过 10 个以上的粒度区间。这些标准物质应通过绝对的方法证实其各粒度区间的质量分数, 如果可能的话, 还应有一个认同的详细操作程序与之相匹配。如果米氏理论应用在数据分析上, 则复合折射率的实部和虚部对某一指定材料而言应是精确的。

如果来自至少 3 次独立测量数据的  $x_{50}$  的平均值或其标准偏差偏离小于有证标准参考物质的平均值或其标准偏差值的 3%, 则认为激光衍射仪的响应曲线与这些标准是相符的。对于  $x_{10}$  和  $x_{90}$  平均值, 其偏离标准值范围应小于 5%。

虽然使用球形的参考材料是理想的, 但也可使用那些非球形材料。不过这些值应该经过了确认并有经认同的详细的激光衍射法操作程序。因此, 如果此参考值来自于激光衍射法以外的其他方法, 则可能产生一个大的偏差。产生这些偏差的原因是由于不同的原理所用不同的方法可导致对颗粒性能不同的灵敏度, 从而可能使同样的非球形颗粒得出不同的等效球直径。

除了上面提到的有证标准物质, 对于在指定范围内具有典型成分和特定粒度分布的其他产品, 如果它们的粒度分布被证明在时间上是稳定的, 也可以用来校准仪器。这些结果应符合以前用有证标准物质所测得的精度和偏差。

在体积比上有着相同特性的两个或更多的标样的混合物, 能用于检测已知成分数量的试样准确度、粒度分辨率以及对细粉或粗粉的灵敏度。因为分样的数量可非常小, 因此从不同原料中正确地取得具有代表性的试样比在正常情况下取样显得更为重要。

6.5.2.2 对于一个激光衍射仪的进一步验证, 可使用一个参考十字线。这样仅仅检查光学镜头和软件的质量, 忽略试样分散和操作过程的影响。对于焦距长度在 300 mm 以上的仪器, 由于斑纹效应, 仪器的十字线是不可靠的。当然光学十字线的正确使用含有一定要求, 即照射光束直径要保证能测量附着点的整个圆形面积。注意: 某些反傅立叶光学仪器(它们的光学十字线必须装置在探测器附近)可能正好落在限制范围之内。如果来自至少 3 次测量值的  $x_{50}$  的平均值的偏离量小于 2%, 并且  $x_{10}$  和  $x_{90}$  的平均值偏离引用值的量小于 3%, 那么可认为激光衍射仪的响应曲线与该标准的要求是相符合的。

#### 6.6 误差来源与诊断

6.6.1 系统的测量误差(偏差), 可来自于不正确的试样制备、偏离颗粒的理论假设和/或是由于对仪器不适当的操作和运行而造成的。

6.6.2 试样制备往往是引起误差的主要因素, 经常来自于如下方面:

——不适当的取样技术, 在测量区检测的是非代表性的试样。如果大量自由流动的原料有一个宽的粒度分布, 那么在使用了不适当的取样方法时, 这种误差尤其突出。但是误差也可能是由

- 于仪器内的传输装置引起的。例如,仪器的泵速太低可能导致大颗粒在管道转弯处沉积;
- 由于分散方式不完善(液体,分散剂,超声波),导致团粒的不充分分散;
- 在分散过程中由于机械外力(例如超声波)而使颗粒粉碎;
- 在测量前或在测量期间,颗粒(液滴)的长大、再团聚、溶解以及蒸发;
- 由于使用泡沫分散剂和/或用力搅拌而使试样中含有气泡;
- 由于分散液的蒸发或燃烧而发生温度波动,从而导致分散液或分散气体中产生不同的折射率。

6.6.3 另外一个主要的误差来源是由于实际材料与理论假定的偏离。同样,这些误差来自不同的方面。

首先,现实情况中的许多颗粒不可能完全服从球形假设,非球形颗粒在不同方向具有不同的横截面积。而颗粒是在所有可能的方位上测量,这就导致颗粒粒度分布相比于等效体积分布时有些加宽。并且,中位径和平均径会向较大粒度偏移。

第二,颗粒表面可能是粗糙的,而非光滑面。这就会引起传播光在边界散射,这经常类似于颗粒的光吸收的影响。

第三,颗粒在光学上经常是不均匀的。诸如多孔颗粒的粒子,这就可能导致大量非常细小颗粒的明显出现,而实际上这些颗粒是不存在的。

最后一点,但并不是最不重要的,可能选用有错误的光学模型或参数。例如,如果试样含有大量细小而透明的颗粒,而使用夫琅和费近似理论,可能会计算出更大数量的细小颗粒(见附录 A)。一般来说,一个错误模型的选择也可能导致通过仪器计算的颗粒浓度与实际浓度有很大差别。

6.6.4 在操作过程或在仪器的运行中出现的误差,列举如下:

- 出现粒径超过测量范围的颗粒。在这种情况下,调整测量范围(改变透镜)或(和)重新去掉过粗的原料,例如通过预先过筛;
- 在透镜工作距离外,试样通过激光束;
- 透镜或测量窗口不干净,应清洗;
- 测量仪在过高背景信号下工作;
- 光学系统没有被正确调整;
- 颗粒浓度过高引起多元散射;
- 将光强值转换为粒度分布的数学程序不适当(与仪器制造厂家联系)。

6.6.5 除上所述,还可能导致随机误差。随机误差可能由以下原因引起:

- 测量时间不充分或记录了单个探测器的输出量;
- 在太低的浓度下工作;
- 仪器有缺陷。例如激光强度不稳定,或探测器元件有噪音。

6.6.6 测量过程的误差能通过以下操作进行校正

- 在空白实验过程中至少用一个小时来测量激光束的光强,使它稳定在仪器操作手册所提供的限定范围内。
- 在一个空白的实验期间,观察来自各个探测器的信号。背景信号应显示出平滑的特征,仅显示微小的正值或为零。负数或超载(超过 100%)结果表明探测器出现错误,其原因为电子元件出错、弄脏或擦伤了窗口玻璃或透镜。在定位的探测器元件上出现大的光强,是由于透镜光学表面破坏而产生的反射,以及透明小容器或别的部件被激光束照射。
- 从重复的试样测量中观察探测信号,计算每个元件的平均值和它们的标准偏差。并且根据先前测量的结果将所有探测元件的测量信号进行比较。这时,对这些信号的精确性和准确性得出的一个印象就是:大的系统差别或零值(对信号来说),通常表明探测器元件有错误,或电子元件损坏,或弄脏了窗口或透镜,或对光不准,或在制样和分散过程中出现空气泡或别的问题。

而且,这些数据在转换成光强值后,能将来自于不同仪器的光散射图进行比较,在某一定程度上不考虑这些仪器中多元探测器的几何形状(如果几何形状已知的话)。

- 当使用同一光学模型作为重叠合法的颗粒粒度分数的消光系数计算时,应比较试样实际浓度与通过试样质量与分散介质体积之比得到的计算浓度之间的差别;差别过大显示光学模型不合适或试样处理不恰当。
- 对于所有探测器元件,比较测量信号与计算信号之间的差别(其结果应与粒度分布吻合),大的系统差别表明元件有错或光学模型不正确。

### 6.7 分辨率和灵敏度

粒度分布的分辨率(即不同颗粒粒度间的区别能力)以及对极少量某一粒径范围内的颗粒的灵敏度通常由下列因素所决定:

- 探测元件的数量、位置和几何形状;
- 探测器元件的信噪比;
- 在所测量散射图中的微细结构;
- 粒度区间之间的散射图差异;
- 颗粒材料的实际粒度范围;
- 光学模型的适合性;
- 在重叠合法中曲线平滑处理的应用。

这些因素阻碍激光衍射技术变成一个高性能的分辨技术,每个粒度等级上的最小粒度宽度通常约为1.1~2(粒度等级的上限与下限的比值)。用于质量控制的实际分辨率和/或灵敏度应通过使用已知组成的混合物而确定。

## 7 结果记录

试验结果应该符合 ISO 9276-1 或相关标准的要求,而且为便于在不同的实验室通过不同的操作者使某一测量值能重现,应记录以下的信息。对某些材料,其中的某些条款是可选的:

- a) 取样
  - 完整的试样描述。例如:化学类型、批数和/或取样地点,取样日期和时间等等;
  - 取样过程。例如:取样方法和试样分样过程;
  - 试样的预先处理(可选)。例如:预先筛分、类型和条件;
  - 分析日期。
- b) 分散
  - 分散的类型。干式或湿式。
  - 对于干式分散:
    - 分散装置的具体描述。例如,注射装置直径,初始压力;
    - 喂料装置的类型;
    - 喂料速率。
  - 对于湿式分散:
    - 分散液。标识、体积,必要时应注明温度;
    - 分散剂。类型和数量;
    - 试样浓度;
    - 超声处理。装置类型、频率(能量)及开始测量前持续与停顿的时间;
    - 泵速。
- c) 激光衍射测量
  - 仪器类型和编号;

- 所用软件的版本；
  - 使用透镜的焦距长度；
  - 测量的实际粒度范围；
  - 最近一次对光日期；
  - 最近校准仪器的日期；
  - 测量的日期和时间；
  - 试样光学浓度；
  - 开始或停止情况下的信号范围(如果使用的话)；
  - 有效值的取值范围(如果使用的话)；
  - 使用的光散射模型；
  - 如果采用米氏理论的话,复合折射率的实部和虚部；
  - (可选的)来自重叠合法中的参数结果。
- d) 分析人员标识
- 实验室的名称和地点；
  - 操作人员名字和特征。



附录 A  
(资料性附录)  
激光衍射法的理论背景

光和颗粒间的四种作用类型:

- 1) 在颗粒截面的衍射(夫琅和费衍射);
- 2) 在颗粒表面的反射,既包括内表面也包括外表面;
- 3) 来自介质到颗粒和颗粒到介质的交界面上的折射;
- 4) 颗粒对光的吸收。

这些相互作用导致了干涉现象,产生一个特征的散射图,它依赖于颗粒的粒度、形状和光学特性。

图 A.1 给出一个例子:

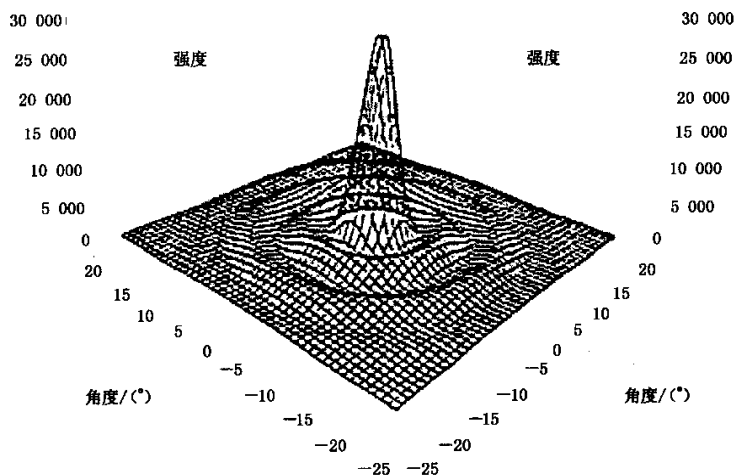


图 A.1 一个 3 μm 球形颗粒的散射光的角度光强图(折射率(RI): 1.60-0i, 波长 633 nm)

图中清楚地表明了单个颗粒的散射图特征:

- 最高的强度,出现在正向位置,并且光强随着衍射角的增大逐渐减弱,在光强上有着很大差别,在不同衍射角出现特征最大值和最小值;
- 球形颗粒的散射图呈环形对称。这些特征是应用激光衍射技术测量颗粒粒度分布的基础。

单个球形颗粒的光散射,能够延伸到颗粒整体,如果:

- 1) 每个颗粒散射是独立的。例如,没有显著的多元散射,这意味着颗粒浓度较低;
- 2) 不同颗粒的散射光之间没有干涉。如果所有颗粒之间能随机的移动,且互相无干扰,并且整个散射图是多次取样得到的,那么,这种情况就是满意的。

对于颗粒粒度分布,激光衍射解释“光谱的数据整理”依赖于两个主要的操作程序。首先要求创立一个数学模型,解释单一颗粒是怎样散射光的。第二,包括由角散射图对粒度分布的重叠合法。

一个单颗粒非偏振光散射可用下式表示:

$$I(\theta) = \frac{I_0}{2k^2 a^2} \{ [S_1(\theta)]^2 + [S_2(\theta)]^2 \}$$

其中:  $I(\theta)$  为总散射光强度,是角度  $\theta$  的函数;

$I_0$  为入射光的光强;

$k$  为波数  $= 2\pi/\lambda$ ;

$\lambda$  为空气中入射光  $I_0$  的波长;

$\alpha$  为散射体到探测器的距离；

$S_1(\theta)$  和  $S_2(\theta)$  是无量纲的，在整个散射理论中是一个综合函数，它描述了关于正方位上偏振光在各自垂直和平行方向的振幅变化与角度  $\theta$  的函数。为了计算这些函数，进而计算  $I(\theta)$ ，已发展了计算机算法。

由某一宽度的粒度区间内的单位体积颗粒在一已知几何形状探测元件上形成的散射光强度由  $I(\theta)$  对粒度区间出现的颗粒数量和元件的几何形状积分得来的。对于一系列的粒度区间和探测器元件，就产生了模型矩阵。

注 1：对于有一定规则形状的非球形颗粒，可应用相似的方程。这些方程由于散射光强度没有环形对称而更加复杂，但是它也依赖于方位角。迄今为止，商业仪器对非球形颗粒都没有一定的模型，因此，这在本标准中不予讨论。

历史上，夫琅和费(Fraunhofer)近似已是用于颗粒粒度测量的第一光学模型的基础。在这种应用中，除了颗粒的球形性外，还有以下严格的假定：

- a) 所有的颗粒都比波长大许多(仅仅考虑在颗粒截面上散射，这也意味着对于很薄的二维环形圆盘，能够获得相同的散射图)；
- b) 仅考虑接近正方向的散射( $\theta$  很小)。对于这些可用近似公式：

$$[S_1]^2 = [S_2]^2 = \alpha^4 \left[ \frac{J_1(\alpha \sin \theta)}{\alpha \sin \theta} \right]^2$$

上面给出的一般公式进行简化得到下面的方程：

$$I(\theta) = \frac{I_0}{k^2 \alpha^2} \alpha^4 \left[ \frac{J_1(\alpha \sin \theta)}{\alpha \sin \theta} \right]^2$$

其中：无量纲的粒度参数  $\alpha = \pi x / \lambda$ ；

$J_1$  是第一种表达形式的贝塞耳函数。

注 2：在表达式的右边经常增加一个额外的项  $(1 + \cos^2 \theta) / 2$  以便于将其延伸到更大角度。

这一方程的优点是它相对简单并且便于计算。这个夫琅霍费(Fraunhofer)近似公式没有利用材料光学特性的任何知识。因此，它可使用于由不同材料混合的样品的测量。在实际情况中，近似公式对那些较大的颗粒(直径至少约为光的波长的 40 倍，或  $a \gg 1$ ) 或者对一些较小的不透明的或相对于悬浮介质有一个高的折射率的颗粒是有效的。然而，对那些相对折射率较低的小颗粒，按体积比例描述某一已知粒度时就出现了错误。这是由于在费琅霍费近似公式中假定对所有颗粒粒度相对于其横截面的吸收率都是常数这一事实引起的；换句话说，它不能预示那些散射光强比几何截面下降得更快的小颗粒。

有着相似的特征，但形式更加复杂的方程，用特殊衍射和 Lorenz-Mie 理论都可表示出来。

在商用仪器中，特殊衍射的近似方程也得到有限的应用。这里应假设：

- a) 所有颗粒都是球形的；
- b) 所有颗粒都是完全不透明的；并且
- c) 颗粒与分散介质间的折射率的差别较小(比率  $< 1.1$ ，或  $(m-1) \ll 1$ )。

这一近似方程包含有一种估计，就是不管吸收率随着颗粒粒度如何变化，都可在一定程度上预测散射率随粒度的变化。因此，在很多时候它应用在液体中悬浮着颗粒的情况下，能得到更精确的粒度分布。这时，夫琅和费假定不合适。

随着功能强大的尖端台式计算机的出现使通过有限次的记录和计算，精确地解决从 Mie 理论到大到单一球体散射的问题成为可能。通过此方式，先前模型的假定被消除(不包括颗粒的球形度)。然而，为了充分利用这一理论，必须知道系统的光学特性。这一特性就是颗粒的复合折射率(包括实部和虚部)和悬浮介质的折射率(实部)。应当注意到这些知识实际运用起来很有困难：尤其虚部经常强烈地依赖于光的波长，因而许多结晶体在不同的结晶方向就是显示出不同的折射率。并且，经常使用折射率的虚部来解释颗粒的特殊表面结构，比如样品的表面粗糙度。附录 D 例举了大量不同的液体和固体的折射率(不考虑表面结构的影响)。

因此,我们可以运用各种理论来计算用来预测角散射图与球形颗粒粒度间的关系的光学模型。由于采取了不同的假定,因此各种理论在适用的颗粒粒度范围和计算机计算的必要时间方面都有不同。通常我们可以通过考虑颗粒粒度折射率实部和吸收率(折射率的虚部)是三个相互垂直的矢量并通过以下特征值的引用使理论模型的选择变得简单一点:

- 颗粒粒度:特征值为最小值与中位值相差  $1\ \mu\text{m}$ ,中位值与最大粒度相差  $50\ \mu\text{m}$ ;
- 折射率的实部(颗粒相对于介质):特征值为  $1.1$ (或  $m-1=0.1$ );
- 颗粒折射率的虚部(吸收率):特征值  $0.05i$ 。

如果颗粒的粒度大于  $50\ \mu\text{m}$ ,那么用夫琅和费近似方程就能得出好的结果。也可以使用 Mie 理论,但事实上它更适合于颗粒的折射率近似于介质的折射率的情况;且矩阵计算时间很长,由于它必须保证系列展开式中有很多项,并且粒度区间的散射应足以覆盖每一个特定粒度。对于小于  $50\ \mu\text{m}$  的颗粒, Mie 理论提供了最好的解决办法。对于中等粒度的颗粒( $1\ \mu\text{m}\sim 50\ \mu\text{m}$ ),并且  $n_p/n_m > 1.1$  和/或  $k_p > 0.05$ ,夫琅和费近似方程也能够给出较好的结果。对于中等粒度的颗粒,当  $n_p/n_m$  和  $k_p$  都较低时,通常特殊衍射近似给出与 Mie 理论相同的结论。在所有使用 Mie 理论的例子中,都必须提供光学特性的合理值。如果不能得到材料的折射率值,那么,就在夫琅和费近似方程与使用复合折射率的实际估计值的 Mie 理论之间选择。前者的优点就是简单和不需要折射率值,后者的优点是通常能提供偏差很小的颗粒粒度分布。在任何情况下,对所作的选择的各个方面都应该搞清楚。

球形颗粒的角度散射图的理论预测与所选择的多元探测器几何形状和精密度一起使用,以便形成一个矩阵用来描述每粒度区间的单位体积颗粒在每个探测单元是如何形成能量信号的。

就散射图的典型特征而论,对于光强分布角度范围宽,粒度分布范围窄以及对角度分辨率高的试样而言是有利的。这样,装配尽可能多的探测器,对仪器来说似乎是有利的。另一方面,每个探测元件上的信号就是散射光强度、元件的几何面积以及其精密度的产物。因此,几何面积的减少都会导致信号变弱,并且信噪比也会降低。这在高散射角时尤其重要,此时散射光的强度通常很低。并且,对于样品所需的足够探测器而言,更多的探测器,对角散射图的变化比率将带来负面影响,这是由于随着探测器的增多,测量误差也会增加,这对计算粒度分布的精度也有不利的影响。在实践中,这将对探测器的数量,大小及其覆盖的角度范围形成一些优化条件。然而应该知道的是,不同的仪器生产厂家所做的设计也不相同。其综合性能应通过标准物质进行确认。

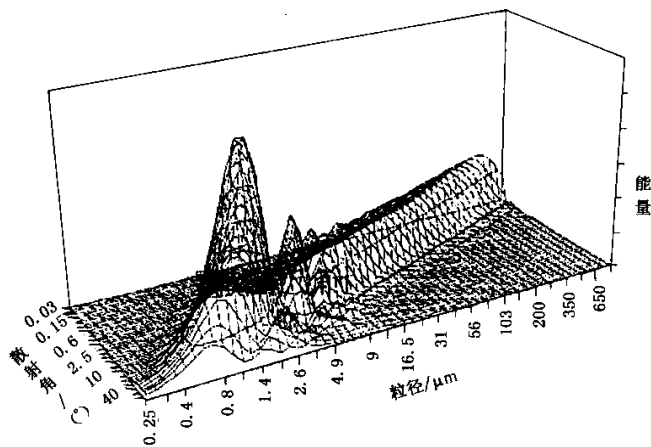


图 A.2 运用 Mie 理论得到的任一探测器上相同体积颗粒的粒度和散射角的角度光强散射图  
( $RI=1.60-0.0i$ ,水  $RI=1.33$ )

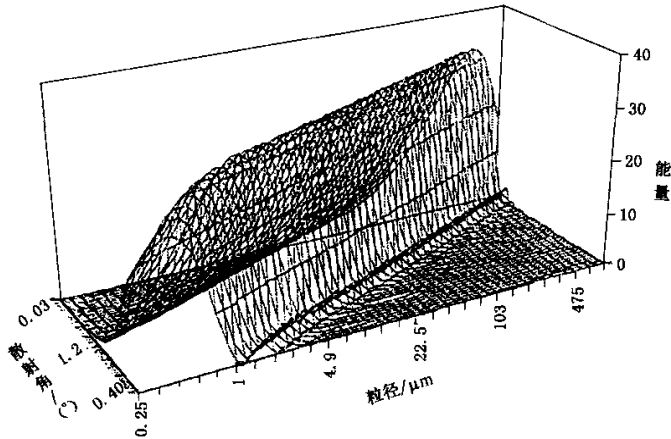


图 A.3 运用 Fraunhofer 理论得到的任一探测器上相同体积颗粒的粒度和散射角的角度光强散射图

为了解释散射图的典型特征,计算出了各种各样的散射图。图 A.2 和图 A.3 给出了不同粒度相同体积的颗粒的三维的角散射图(在图中对一个任意的探测器几何形状,探测器按照能量信号进行输出,随着角度的增加,探测器元件的几何尺寸也显著增加)。对于图 A.2,是使用 Mie 理论进行计算的。对于图 A.3 是用夫琅和费近似进行计算的。通过两个图形的比较,可以说明两个理论的大(乳状液)颗粒(颗粒粒度在  $10\ \mu\text{m}$  到  $20\ \mu\text{m}$  以上)的散射图看上去十分相似,随着颗粒粒度增大探测器信号向着更小角度转换。

另一方面,对粒度大约在  $10\ \mu\text{m}$  以下的颗粒的探测信号的区别也被清楚的显示出来:夫琅和费理论预测了在减小颗粒粒度时仅有微小差别,然而 Mie 理论推导出与颗粒粒度有关的最大光强的强烈波动,对于某些粒度的颗粒 Mie 理论得到信号要比与之相应的夫琅和费理论产生的更高,而对于别的粒度就更低。

这些类型的三维散射图的截面图在图 A.4~图 A.6 中显示出来,注意目前的信号代表散射光强度。

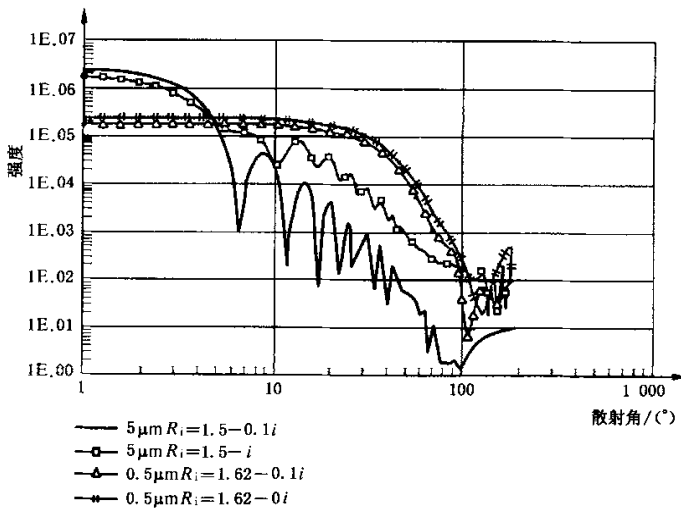


图 A.4 相同体积的颗粒粒度大小对角度光强散射图的影响  
(介质:水  $R_i=1.33$ )

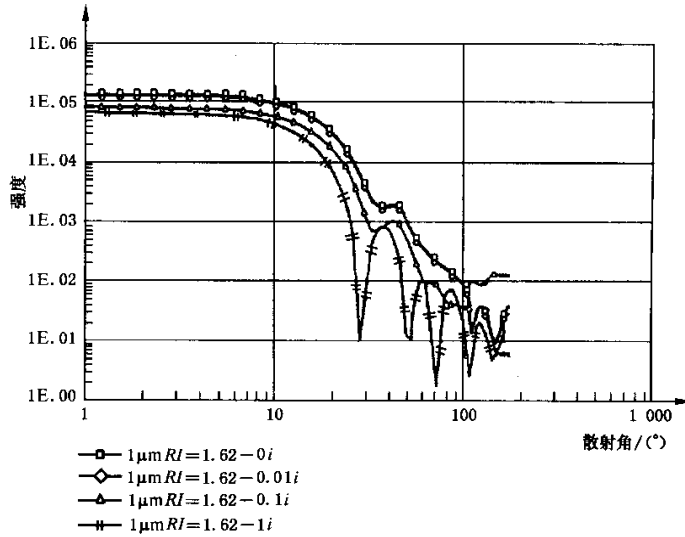


图 A.5 1 μm 的颗粒不同的虚部(吸光系数)对角度光强的影响(介质:水 RI=1.33)

图 A.4 清晰的说明了近似单分散颗粒粒度分布的散射行为的典型特征。首先,在强度曲线上有最大值和最小值,它们的角度位置主要由颗粒粒度控制。例如,0.5 μm 颗粒的第一个最小值位于 100° 以上,相对而言 5 μm 的颗粒则在 10° 左右。早期设计的仪器的测量能力至多仅为 15° 角。当然,在正方向上精细结构的出现,对于大颗粒来说就便于它们的区分。相反对于亚微米颗粒来说,因为正方向上缺少强度的显著差别所以还需要额外的信息。因此,现代化仪器的测量范围延伸到 1 μm 以下,并且他们可以收集大于 15° 角的信号。然而,应注意在最大最小位置上折射率的次要影响。

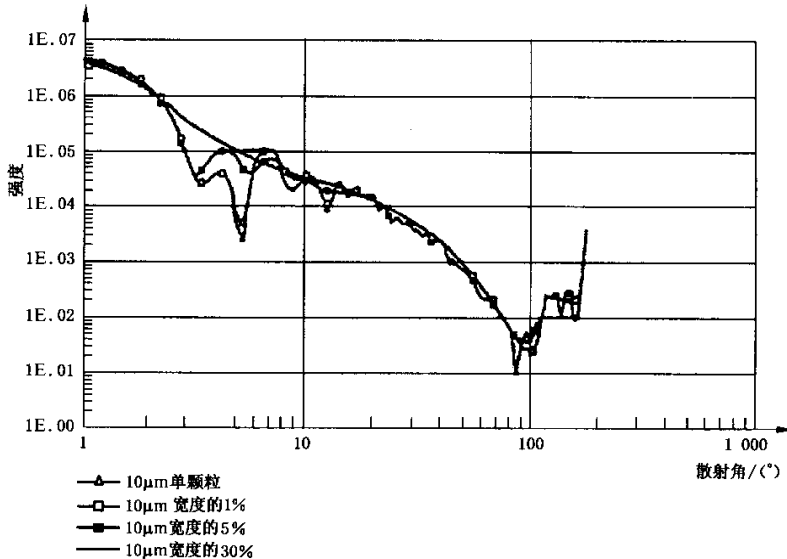


图 A.6 10 μm 颗粒的正态分布宽度对角度光强散射图的影响  
(颗粒 RI=1.62, 水介质 RI=1.33)

第二,该图能够解释,对于某一体积的大颗粒的散射光强与具有相同体积的小颗粒的散射光强相比,大颗粒在小角度下的光强比小颗粒大,而在大角度下的光强比小颗粒小。然而,须记住颗粒粒度比率为 10 则导致其体积比为 1 000。还应记住,在测量期间,由于绝对光强也与颗粒浓度有关,因此总的来说,仅角度与散射光强的相对变化才是重要的。

第三,图 A. 4 和图 A. 5 显示了朝着角度增大的方向,散射光强全面下降,以及显示了光学模型或折射率的影响。例如,与透明颗粒相比,颗粒对光线的少量吸收,就会出现更低的光强和更精细的结构。

对于夫琅和费近似,这些影响通常更大。从图 A. 4 和图 A. 5 中我们能够得出一个结论,使用错误的光学模型,例如,夫琅和费近似或透明颗粒的消光值,就需要通过“近似的”增加细颗粒对在大角度上的少量散射光进行补偿。最后,图 A. 6 表明,对于单一粒度和狭窄粒度分布的颗粒,在多角度散射图中显示出了精细结构。对于稍宽一点的粒度分布,这些精细结构就未能保住。这可以从颗粒粒度在最大和最小位置上的强烈影响来解释。结果是,对不同粒度的最大最小值应进行补偿,这一补偿使宽颗粒粒度分布的多角散射图变得平滑。例如,对于在 10 μm 左右的粒度分布,有一个 30% 的宽度(表示为变异系数),随着角度增大至到大约 90°,光强不断下降,就产生了平滑的没有最大最小值的曲线。总的来说,这些图表明,从激光衍射技术上来说,对于较宽的粒度分布,不能期望得到有关粒度的高分辨率。更进一步说,当在处理一般情况的宽范围粒度分布时,探测信号中的微小错误,就可能导致颗粒粒度分布结果的重大不同。当然,这类错误的影响,很大程度依赖于使用在重叠合法中的数学程序,包括约束条件和曲线的平滑处理(见 6. 3. 1 和 6. 7)。

至此,已经讨论了各种颗粒粒度的散射图的预测。这些推测常常由仪器中以及在矩阵形式中选择的多元探测器的几何形状一起来实现。此矩阵形式用来描述,  $M$  个颗粒粒度区间的每个区间的单位体积是怎样在  $n$  个探测器元件的每一个中作为一个信号出现的。例如,在矩阵中的第一行( $M_{1,1} \dots M_{1,m}$ ),描述了所有  $m$  个粒度区间的单位体积在第一个探测器上的信号,而第一列( $M_{1,1} \dots M_{n,1}$ )表示第一个粒度区间在  $n$  个探测器元件中的每一个的分布。在矩阵算法中可以写作:

$$L = M \times S$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & M_{1,1} & \dots & \dots & \dots & \dots & M_{1,m} & S_1 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & & & \times & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & & & & \vdots \\ L_n & M_{n,1} & \dots & \dots & \dots & \dots & M_{n,m} & S_m \end{bmatrix}$$

在这个形式中,探测器信号的集合可看作是粒度分布与散射矩阵的乘法的结果。然而在实际的测量实践中,也需要这个问题的逆矩阵。因为,来自所有探测器中的信号都要测量。在仪器中计算过的矩阵就是有效的,并且颗粒粒度分布可从下面计算式中得到:

$$S = M^{-1} \times L$$

由于测量错误,在没有不可行的约束条件下仍采取直接变换,因此,这类方程不适合且情况不稳定。因此,一定程度的约束条件是必要的,从一个厂家到另一厂家的约束条件的变化依赖于它们的设计、探测器的数量、噪音水平和经验。没有充足的约束变换就会导致多分散分布的结果在直方矩阵数据中出现波动,严重缺乏约束就可能产生零或负值以及错误的模式。另一方面,过多约束将会产生分辨能力的下降和实际颗粒粒度分布的加宽。

**附 录 B**  
(资料性附录)  
**仪器规格介绍**

要求仪器生产厂家提供与下列条款有关的激光衍射仪规格。

**B.1 常规要求**

- 电流要求；
- 重量；
- 容积；
- 特殊要求,如温度、湿度、震动、安全性等。

**B.2 光源/激光**

- 类型；
- 波长；
- 输出功率；
- 强度稳定性(允许的波动程度)；
- 平行或会聚光束；
- 在样品里的光源宽度/大小；
- 极性；
- 典型寿命。

**B.3 样品通路**

- 在激光束中样品的通道长度；
- 液体泵速或在干式扩散中粒子与空气的速度；
- 声处理功率/频率；
- 循环系统和光电管的体积；
- 与粒子及分散液相接触的系统材料；
- 能被分散或操作的最大颗粒粒径/密度。

**B.4 透镜**

- 焦距长；
- 工作距离；
- 是否固定或要求变动。

**B.5 探测器**

- 元件数量；
- 探测器的阵列方式及几何形状(如半圆或四分之一圆形、扇形等)；
- 自动或手动对光；
- 探测器元件是否已校准；
- 空白试验的常态探测信号的指示和它们的最大允许范围；
- 探测元件的超载水平。

## B.6 测量

- 典型测量时间；
- 连续测量的最短时间间隔。

## B.7 计算机

- 计算机类型；内存大小；速度；
- 操作系统；
- 磁盘类型与尺寸；监测器类型；键盘类型；
- 实时接口打印机类型/规程；
- 网络功能/规程；
- 配备计算矩阵模型的设备；
- 配备用于多元散射校正的设备。

## B.8 重叠合法

- 能采用的光学模型；
- 指明数学过程的种类，如加权、约束条件和曲线平滑处理。

## B.9 输出

- 全部的以及每次测量过程中的测量范围；
- 粒度范围，是否固定或是可调的；
- 输出类型，如微分和累积分布，给定百分含量时的粒度值和或某一粒度下的百分含量、分布模型等；
- 数据储存；背景和试样的光散射通量密度。

## B.10 性能

- 重复性，在一台仪器之内；
- 复现性，一台仪器相对于另一台仪器；
- 分辨率和粒度区间粒级的数量；
- 对应于在粒度分布内(测量范围内)的少量小颗粒和大颗粒的较低探测极限；
- 指明颗粒直径超出测量范围的情况。



**附 录 C**  
**(资料性附录)**  
**激光衍射法用分散液体**

许多液体都可用于分散粉末,它们应具有:

- a) 在激光波长范围内应是透明的(如 He-Ne 激光的波长为 633 nm);
- b) 与使用的仪器材料(如 O 型圈、试管等)能配套使用;
- c) 不会溶解或改变颗粒材料的粒度;
- d) 对空气泡或其他粒子是不相溶的;
- e) 相当容易且稳定地分散颗粒材料;
- f) 其折射率与颗粒材料相差很大;
- g) 有合适的粘度,可以循环;
- h) 对健康无危险,符合安全要求。

水是经常使用的分散液体。加入低泡沫的表面活性剂,以降低水的表面张力(这样,就容易浸润粒子)。另外一种分散剂(常为聚电解质)用于稳定分散效果。还可选用有机液,如乙醇、异丙醇、己烷或异辛烷。附录 D 列出了不同液体的折射率。

附录 D  
(资料性附录)

各种液体和固体的折射率

在 20℃~25℃ 温度区间,空气的折射率=1。推荐使用以下列出的折射率值,以便各实验室得到一致结果。其他参考方面可能列出的是不同的值。所有使用的折射率值必须是已经公布的。折射率值常依赖于光的波长,这样,当采用另一波长的光源时,应当查阅资料以辨别数据是否有效。

D.1 液体

表 D.1 液体折射率

名 称	折 射 率	在空气中的波长/nm
acetone 丙酮	1.359	589
carbon tetrachloride 四氯化碳	1.460	589
castor oil 蓖麻油	1.477	589
chloroform 三氯甲烷	1.446	589
cyclohexane 环己烷	1.427	589
decaline(translcis) 萘烷	1.47~1.48	589
n-decane n-癸烷	1.410	589
diethylene glycol 二甘醇	1.447	589
diethylether 二乙醚	1.353	589
ethanol 乙醇	1.361	589/687
ethylbenzene 乙苯	1.496	589
ethylene glycol 乙二醇	1.432	589
fluorocarbon 112 氟塑料 112	1.413	589
glycerol 丙三醇	1.475	589
n-heptane 正庚烷	1.388	589
n-hexane 正己烷	1.375	589
isopropyl alcohol 异丙醇	1.378	589
linseed oil 亚麻油	1.478	589
methanol 甲醇	1.329	589
methylethylketone(MEK) 丁酮	1.379	589
olive oil 橄榄油	1.468	589
polyethylene glycol 300 聚乙二醇	1.47	589
silicone oil(dimethyl) 硅油(二甲基)	1.40	
silicone oil(methyl-phenyl) 硅油(乙苯基)	1.42~1.53	589
toluene 甲苯	1.496	589
trichloroethylene 三氯乙烯	1.477	589
water 水	1.333	589
p-xylene 对二甲苯	1.495	589

D.2 固体

表 D.2 列出的大部分(矿物)成分来自自然资源,因此,它们的化学组成可能有差异,并且,许多原料是各向异性的。所有或其中之一的影响导致所表明的折射率值有一个范围。

非透明粒子的表面粗糙度常用假定折射率的虚部范围在 0.01i~0.1i 进行计算。这样,在以下的表 D.2 中,带星号(\*)的这些材料由于文献资料没有提供折射率虚部数值,其折射率的虚部在 0.01i~

0.1 $\lambda$ 范围内进行选择。

表 D.2 固体折射率

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
acetic Anhydride	乙酸酐,无水醋酸		1.390	*	589
acetylene soot	乙炔		1.56~1.99	0.3~0.50	633
actinolite	阳起石		1.618~1.641	*	589
adularia moonstone	冰长石(月长石)		1.525	*	589
adventurine (feldspar)	砂金石(长石)		1.532~1.542	*	589
adventurine (quartz)	砂金石(石英)		1.544~1.553	*	589
agalmatoite (Agalmatolite)	寿山石,冻石		1.55	*	589
agate	玛瑙	SiOn	1.544~1.553	*	589
alabandite	硫锰矿	MnS	2.70	*	589
albite (feldspar)	钠长石(长石)	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.525~1.536	*	589
albite (moonstone)	钠长石(月长石)	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.535	*	589
alexandrite	紫翠玉	BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.744~1.755	*	589
alginic acid, sodium salt	藻朊酸,钠盐		1.334	*	589
almandite	石榴石,铁铝榴石		1.790	*	589
alumina ( $\alpha$ )	氧化铝	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.765	*	589
alumina ( $\gamma$ )	氧化铝	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.7	*	589
aluminite	矾石,铝氧石	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )(OH) <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	1.46~1.47	*	589
aluminum	铝	Al	1.48	3.9	657
aluminum	铝	Al	2.143	*	729
aluminum	铝	Al	0.598	*	443
aluminum	铝	Al	1.304	*	620
aluminum	铝	Al	2.237	*	886
aluminum chloride	氯化铝	AlCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub>	1.56	*	589
aluminum nitrate	硝酸铝	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 9H <sub>2</sub> O	1.54	*	589
aluminum oxide	氧化铝	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.768	*	589
aluminum oxide	氧化铝	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	1.624	*	589
alunite	明矾石	(K, Na)Al <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1.57~1.59	*	589
amazonite (feldspar)	天河石,绿长石(长石)		1.525	*	589
amber	琥珀		1.54	*	589
amblygonite	锂磷铝石		1.611~1.637	*	589
amethyst	紫水晶	SiO <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O	1.533~1.553	*	589

表 D.2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
ammonium aluminum sulfate	硫酸铝铵	$\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	1.459	*	589
ammonium calcium phosphate	磷酸钙铵	$\text{NH}_4\text{CaPaO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.561	*	589
ammonium chloride	氯化铵	$\text{NH}_4\text{Cl}$	1.642	*	589
ammonium ditartrate	酒石酸氢铵	$(\text{NH}_4)_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$	1.55~1.58	*	589
ammonium hydrocarbonate	碳酸氢铵	$\text{NH}_4\text{HCO}_3$	1.423	*	589
ammonium hydroditartrate	酒石酸氢铵	$\text{NH}_4\text{HC}_4\text{H}_4\text{O}_6$	1.561	*	589
ammonium hydrosulfate	硫酸氢铵	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{SO}_4$	1.473	*	589
ammonium hydrosulfide	氢硫化铵	$\text{NH}_4\text{HS}$	1.74	*	589
ammonium nitrate	硝酸铵	$\text{NH}_4\text{NO}_3$	1.41	*	589
ammonium perchlorate	高(过)氯酸铵	$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	1.482	*	589
ammonium sulfite	亚硫酸铵	$(\text{NH}_3)_2\text{SO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.515	*	589
ammonium zinc sulfate	亚硫酸锌铵	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.493	*	589
andalusite	方沸石	$\text{NaAl}_3\text{Si}_2\text{O}_6\text{H}_2\text{O}$	1.48~1.49	*	589
anatase	锐钛矿	$\text{TiO}_2$	2.49~2.56	*	589
andalusite	红柱石	$\text{Al}_2\text{OSiO}_4$	1.63~1.65	*	589
anhydrite	无水石膏	$\text{CaSO}_4$	1.57~1.61	*	589
anglesite	硫酸铅矿	$\text{PbSO}_4$	1.87	*	589
anorthite	钙长石	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7/\text{CaAl}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{SiO}_3$	1.583	*	589
anorthoclase	斜长石	$(\text{K, Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	1.52~1.53	*	589
antimony bromide	溴化锑	$\text{SbBr}_3$	1.74	*	589
antimony pentachloride	五氯化锑	$\text{SbCl}_5$	1.601	*	589
antimony tetraoxide	四氧化锑	$\text{Sb}_2\text{O}_4/\text{Sb}_2\text{O}_3 \cdot \text{Sb}_2\text{O}_3$	2.00	*	589
antimony trisulfide	三硫化锑	$\text{Sb}_2\text{S}_3$	4.064	*	589
antimony trioxide	三氧化锑	$\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{Sb}_4\text{O}_7$	2.087~2.18	*	589
apatite	磷灰石	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH, F, Cl})$	1.63~1.67	*	589
apophyllite	鱼眼石		1.536	*	589
aquamarine	绿玉		1.577~1.583	*	589
aragonite	霏石,文石	$\text{CaO}_3$	1.53~1.69	*	589
arsenic triiodide	三碘化砷	$\text{AsI}_3$	2.23~2.59	*	589
arsenic trioxide	砒霜,三氧化二砷	$\text{As}_2\text{O}_3/\text{As}_4\text{O}_6$	1.76~1.9	*	589
arsenic trisulfide	三硫化二砷	$\text{As}_2\text{S}_3$	2.597 6	0.42	644

表 D.2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
arsenic trisulfide	三硫化二砷	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2.558 6	0.13	701
artinite	水纤菱镁矿	MgCO <sub>3</sub> · Mg(OH) <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O	1.489	*	589
augelite	光彩石		1.574~1.588	*	589
azurite	蓝铜矿	2CuCO <sub>3</sub> · Cu(OH) <sub>2</sub>	1.730	*	589
baddeleyite	斜锆石, 二氧化锆	ZrO <sub>2</sub>	2.17	*	589
barite	重晶石, 硫酸钡	BaSO <sub>4</sub>	1.64~1.65	*	589
barium acetate	醋酸钡	Ba(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	1.52	*	589
barium chloride (a)	氯化钡	BaCl <sub>2</sub>	1.73	*	589
barium dithionate	过二硫酸钡	Ba(SO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.58	*	589
barium fluoride	氟化钡	BaF <sub>2</sub>	1.484	*	404
barium fluoride	氟化钡	BaF <sub>2</sub>	1.476	*	546
barium fluoride	氟化钡	BaF <sub>2</sub>	1.474	*	589
barium fluoride	氟化钡	BaF <sub>2</sub>	1.473	*	656
barium fluoride	氟化钡	BaF <sub>2</sub>	1.472	*	706
barium fluoride	氟化钡	BaF <sub>2</sub>	1.469	*	894
barium formate	甲酸钡	Ba(CHO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	1.59	*	589
barium hydroxide	氢氧化钡, 羟化钡	Ba(OH) <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O	1.47	*	589
barium oxide	氧化钡	BaO	1.9	*	589
barium selenide	硒化钡	BaSe	2.26	*	589
barium sulfide	硫化钡	BaS	2.15	*	589
barium titanate	钛酸钡	BaTiO <sub>3</sub>	2.4	*	589
barium yellow	铬酸钡	BaCrO <sub>4</sub>	1.94~1.98	*	589
basic artinite	碱性水纤菱镁矿	MgCO <sub>3</sub> · Mg(OH) <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O	1.534	*	589
bastnaesite	碳酸铁铈	CeFeCO <sub>3</sub>	1.717	*	589
bauxite	矾土, 铁铝氧石	AlO(OH)	1.56~1.75	*	589
bayerite	拜耳体(石)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O	1.583	*	589
beeswax (white)	蜂蜡(白)		1.45~1.47	*	589
beryl	绿玉, 绿宝石		1.577~1.583	*	589
beryl (white, colorless)	绿宝石(白、无色的)		1.577~1.583	*	589
beryllium aluminate	铝酸铍		1.75	*	589
beryllium aluminum silicate	硅酸铝铍	Be <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub>	1.580	*	589
beryllonite	磷酸钠铍石		1.553~1.562	*	589

表 D.2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
bieberite	钴矾	$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.47	*	589
bischofite	水氯镁石	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.495	*	589
bismuth trioxide	三氧化二铋	$\text{Bi}_2\text{O}_3$	1.9	*	589
bisphenol-A polycarbonate	双酚-聚碳酸酯		1.586	*	589
bloedite(Blodite)	热风	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.486	*	589
boehmite	勃母石,一水软铝石	$\text{AlO}(\text{OH})$	1.64~1.67	*	589
bone Ash	骨灰		1.60~1.66	*	589
boracic acid	硼酸	$\text{H}_3\text{BO}_3$	1.337~1.462	*	589
boron oxide	氧化硼	$\text{B}_2\text{O}_3$	1.63	*	589
borax	硼砂	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	1.45~1.47	*	589
boric acid	硼酸	$\text{HBO}_2$	1.62	*	589
brazilianite	磷铝钠石,银星石		1.603~1.623	*	589
bromellite	铍石,氧化铍	$\text{BeO}$	1.720~1.735	*	589
brochantite	水胆矾,水砷酸铜	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	1.771	*	589
bromyrite	溴银矿	$\text{AgBr}$	2.253	*	589
brookite	板钛矿	$\text{TiO}_2$	2.58~2.70	*	589
brucite	水镁石,氢氧化镁	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	1.56~1.60	*	589
brushite	钙磷石	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.557	*	589
bunsenite	氧化镍	$\text{NiO}$	2.182	*	589
butyl rubber (unvulcanized)	丁基橡胶(未硫化的)		1.508	*	589
butylphenol formaldehyde resin	甲醛丁基苯酚树脂		1.66	*	589
cadmium	镉	$\text{Cd}$	1.13	*	589
cadmium fluoride	氟化镉	$\text{CdF}_2$	1.56	*	589
cadmium metasilicate	硅酸镉	$\text{CdSiO}_3$	1.739	*	589
cadmium oxide	氧化镉	$\text{CdO}$	2.49	*	589
cadmium sulfate	硫酸镉	$3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	1.565	*	589
cadmium yellow	硫化镉	$\text{CdS}$	2.35~2.53	*	589/625
calcite	方解石	$\text{CaCO}_3$	1.49~1.66	*	589/643
calcium acetate	醋酸钙	$\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$	1.55	*	589
calcium aluminate	铝酸钙	$\text{CaAl}_2\text{O}_4/\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	1.643	*	589
calcium aluminosilicate	铝硅酸钙	$2\text{CaAl}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	1.669	*	589
calcium carbide	碳化钙	$\text{CaC}_2$	1.75	*	589
calcium carbonate	碳酸钙	$\text{CaCO}_3$	1.486~1.681	*	589
calcium chloride	氯化钙	$\text{CaCl}_2$	1.52	*	589

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
calcium chloride	氯化钙	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.417	*	589
calcium fluoride	氟化钙	$\text{CaF}_2$	1.437	*	486
calcium fluoride	氟化钙	$\text{CaF}_2$	1.436	*	500
calcium fluoride	氟化钙	$\text{CaF}_2$	1.434	*	587
calcium fluoride	氟化钙	$\text{CaF}_2$	1.432	*	656
calcium fluoride	氟化钙	$\text{CaF}_2$	1.431	*	728
calcium fluoride	氟化钙	$\text{CaF}_2$	1.430	*	884
calcium hydroxide	氢氧化钙	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	1.574	*	589
calcium hypochlorite	次氯酸钙	$\text{Ca}(\text{ClO})_2$	1.545~1.69	*	589
calcium magnesium carbonate	碳酸镁钙	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	1.681	*	589
calcium magnesium metasilicate	硅酸镁钙	$\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	1.665	*	589
calcium metaborate	硼酸钙	$\text{Ca}(\text{BO}_3)_2$	1.550~1.660	*	589
calcium metaphosphate	偏磷酸钙	$\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$	1.588	*	589
calcium orthophosphate	正磷酸钙	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1.629	*	589
calcium peroxide	过氧化钙		1.895	*	589
calcium phosphate	磷酸钙	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	1.529	*	589
calcium phosphate	磷酸钙	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.439	*	589
calcium phosphate	磷酸钙	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1.60~1.66	*	589
calcium pyrophosphate	焦磷酸钙	$\text{Ca}_2(\text{P}_2\text{O}_7)$	1.585	*	589
calcium stearate	硬脂酸钙	$\text{Ca}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$	1.46	*	589
calcium sulfate	硫酸钙	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.521	*	589
calcium sulfate (anhydrite)	石膏(硬石膏)	$\text{CaSO}_4$	1.569	*	589
calcium trialuminate	三铝酸钙	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_7, 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	1.710	*	589
camauba wax	蜡		1.47	*	589
cancrinite	灰(钙)霞石		1.491~1.524	*	589
carbon black	炭黑	C	1.6~2.0	0.30~0.80	633
celestite	天青石(硫酸锶)	$\text{SrSO}_4$	1.622~1.631	*	589
celite	C盐、寅式盐/次乙酰塑料		1.98	*	589
cellulose	纤维素		1.54	*	589
cellulose acetate	醋酸纤维		1.475	*	589
cellulose acetate butyrate	丁醋酸纤维		1.475	*	589
cellulose nitrate	硝酸纤维		1.51	*	589

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
ceragyrite	氯化银	AgCl	2.071	*	589
cerium fluoride	氟化铈	CaF <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.614	*	589
cerium molybdate	钼酸铈	Ce <sub>2</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	2.019	*	589
ceruseite	白铅矿(碳酸铅)	PbCO <sub>3</sub>	2.076	*	589
cesium aluminum sulfate	硫酸铝铯	CsAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 12H <sub>2</sub> O	1.45	*	589
cesium borohydride	氢化硼铯	CsBH <sub>4</sub>	1.49	*	589
cesium bromide	溴化铯	CsBr	1.69	*	589
cesium bromide	溴化铯	CsBr	1.709	*	500
cesium chloride	氯化铯	CsCl	1.69	*	589
cesium iodide	碘化铯	CsI	1.806	*	500
cesium iron sulfate	硫酸铁铯	Cs <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · FeSO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1.565	*	589
cesium selenate	硒酸铯	Cs <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>	1.59	*	589
cesium sulfate	硫酸铯	Cs <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.56	*	589
chalcedony	玉髓	SiO	1.53~1.54	*	589
chalcedony	玉髓		1.535~1.539	*	589
chalk	粉笔(碳酸钙)	CaCO <sub>3</sub>	1.51~1.65	*	589
chlorocalcite	绿方解石	KCl · CaCl	1.52	*	589
chromium	铬	Cr	1.800	*	443
chromium	铬	Cr	3.480	*	620
chromium	铬	Cr	3.840	*	701
chromium	铬	Cr	4.420	*	912
chromium orthophosphate	正磷酸铬	CrPO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1.56	*	589
chromium oxide	氧化铬	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.55	*	589
chromium sulfate	硫酸铬	Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 8H <sub>2</sub> O	1.56	*	589
chrysoberyl	金绿玉		1.746~1.755	*	589
chrysocolla	硅孔雀石		1.5	*	589
chrysoprase	绿玉髓		1.534	*	589
citrine	黄水晶		1.55	*	589
cobalt ammonium cobaltate tetranitrodiamine	四硝基二氨基钴铈	NH <sub>4</sub> [Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> ]	1.7	*	589
cobalt chloride	氯化钴	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1.6	*	589
cobalt nitrate	铵酸钴	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	1.55	*	589
cobalt selenate	硒酸钴		1.52	*	589
cobalt acetate	醋酸钴	Co(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	1.54	*	589



表 D.2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
cobalt(single crystal E $\perp$ C)	钴(单晶)	Co	1.720	*	442
cobalt(single crystal E $\perp$ C)	钴(单晶)	Co	2.130	*	590
cobalt(single crystal E $\perp$ C)	钴(单晶)	Co	2.830	*	729
cobalt(single crystal E $\perp$ C)	钴(单晶)	Co	3.550	*	886
cobalt(single crystal E//C)	钴(单晶)	Co	1.660	*	443
cobalt(single crystal E//C)	钴(单晶)	Co	2.130	*	590
cobalt(single crystal E//C)	钴(单晶)	Co	2.660	*	701
cobalt(single crystal E//C)	钴(单晶)	Co	3.370	*	827
colemanite	硬硼钙石		1.586~1.614	*	589
common salt (halite)	氯化钠	NaCl	1.544	*	589
copper	铜	Cu	1.170	*	443
copper	铜	Cu	0.470	*	590
copper	铜	Cu	0.220	*	729
copper	铜	Cu	0.260	*	886
copper carbonate	碳酸铜	CuCO <sub>3</sub>	1.655	*	589
copper perchlorate	高(过)氯酸铜	Cu(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.495	*	589
copper chloride (ous)	氯化铜	CuCl/Cu <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	1.495	*	589
copper sulfate	硫酸亚铜	Cu <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.724	*	589
copper sulfate	硫酸铜	CuSO <sub>4</sub>	1.733	*	589
coral	珊瑚		1.486~1.658	*	589
cordierite	堇青石		1.54	*	589
corning Pyrex cylinder	麻粒硼硅酸圆柱体		1.470	*	633
corundum	刚玉、金刚石、氧化铝	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.76~1.77	*	589/668
cotunite	氯化钡	PbCl <sub>2</sub>	2.199	*	589
covellite	蓝铜、硫化铜	CuS	1.45	*	589
cuprite	赤铜矿	Cu <sub>2</sub> O	2.705	*	589
cussiterite	二氧化锡	SnO <sub>2</sub>	1.997	*	589
danburite	赛黄晶		1.633	*	589
diamond	金刚石、钻石	C	2.41~2.42	*	589/644
cristobafite	方晶(石英、二氧化硅)	SiO <sub>2</sub>	1.48	*	589
diaspore	水铝石、水矾石	AlO(OH)	1.68~1.75	*	589
diopside	透辉石	CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	1.817	*	589
dolomite	白云石、大理石	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.50~1.68	*	589
ekaniite	硅钙铁铀钍矿		1.60	*	589

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
elaeolite	脂光石		1.532~1.549	*	589
emerald	翡翠	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	1.56~1.60	*	589
epsomite	硫酸镁,泻盐	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.433	*	589
enstatite	顽辉(火)石		1.663~1.673	*	589
eriochaleite	氯化铜	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.644	*	589
ethyl cellulose	乙基纤维		1.479	*	589
euclase	蓝柱石		1.652~1.672	*	589
eulytite	闪铋石	$2\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	2.05	*	589
ferberite	钨铁矿	$\text{FeWO}_4$	2.40	*	589
fibrolite	低盐纤维		1.659~1.68	*	589
fluorite	氟化钙	$\text{CaF}_2$	1.43~1.44	*	589/644
formazine	苯基		1.85	*	589
feldspar	长石	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8/\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	1.525	*	589
gaAs	砷化镓		4.3	*	589
galena	方铅矿,硫化铅	$\text{PbS}$	3.921	*	589
garnet	石榴石,金刚砂		1.71~1.89	*	589
gaylussite	单斜钠钙石		1.517	*	589
gallium oxide	氧化镓	$\text{Ga}_2\text{O}_3$	1.92	*	589
germanium oxide	氧化锗	$\text{GeO}$	1.650	*	589
germanium tetrabromide	四溴化锗	$\text{GeBr}_4$	1.626	*	589
gibbsite	(三)水铝矿	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1.577	*	589
gibbsite	(三)水铝矿,水铝氧	$\text{Al}(\text{OH})_3$	1.56~1.60	*	589
glass	玻璃		1.44~1.9	*	589
glass Borosilicate	硼硅玻璃、光学(硅酸硼)玻璃	NIST-SRM 1820	1.487	*	436
glass Heavy Silicate Flint	重硅酸水石玻璃		1.65	*	589/656
glass Soda Lime	碱石灰玻璃	NIST-SRM 1822	1.529	*	436
glass Very Heavy Silicate Flint	超重硅酸火石玻璃		1.89	*	589/656
glauber's salt	硫酸钠、芒硝	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	1.394	*	589
goethite	针铁矿	$\text{FeO}(\text{OH})$	2.26~2.52	*	589
gold	金	$\text{Au}$	0.28	2.2	600
gold	金	$\text{Au}$	0.31	2.7	650
gold (electroplated)	金(电(解)抛光)	$\text{Au}$	1.460	*	443

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
gold (electroplated)	金(电(解)抛光)	Au	0.180	*	590
gold (electroplated)	金(电(解)抛光)	Au	0.080	*	774
gold (electroplated)	金(电(解)抛光)	Au	0.080	*	886
graham's salt	磷酸钠	( $\text{NaPO}_3$ ) <sub>6</sub>	1.482	*	589
graphite	石墨	C	1.8	0.6~0.8	633
graphite	石墨	C	2.5	1.5	589
greenockite	硫化镉	CdS	2.51~2.53	*	589
grossularite	钙铝榴石		1.73~1.75	*	589
gypsum	石膏、硫酸钙	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.52~1.53	*	589
hafnium fluoride	氟化铪	$\text{HfF}_4$	1.56	*	589
hafnium (single crystal E//C)	铪(单晶)	Hf	2.540	*	443
hafnium (single crystal E//C)	铪(单晶)	Hf	3.640	*	590
hafnium (single crystal E//C)	铪(单晶)	Hf	3.520	*	729
hafnium(single crystal E//C)	铪(单晶)	Hf	3.720	*	886
hafnium(single crystal E⊥C)	铪(单晶)	Hf	2.310	*	443
hafnium(single crystal E⊥C)	铪(单晶)	Hf	3.350	*	590
hafnium(single crystal E⊥C)	铪(单晶)	Hf	3.630	*	729
hafnium(single crystal E⊥C)	铪(单晶)	Hf	3.610	*	886
halite	氯化钠(天然)岩盐	NaCl	1.544	*	589
hambergite	硼铍石		1.559~1.631	*	589
hausmannite	黑锰矿,四氧化三锰	$\text{Mn}_3\text{O}_4$	2.46	*	589
hausmennite	黑锰矿,四氧化三锰	$\text{Mn}_3\text{O}_4$	2.1~2.5	*	671
haunite	蓝方石		1.502	*	589
hematite	三氧化铁锈层	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2.9~3.2	0.01	589
hemimorphite	异极矿	$2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.614~1.636	*	589
hiddenite	翠绿锂辉石		1.655~1.68	*	589
hopeite	磷锌矿	$\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.572~1.574	*	589
howlite	硅硼钙石		1.586~1.609	*	589
hydroxyapatite	氢氧磷盐石	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{H}_2$	1.63	*	589
hydraargilite	三氧化二铝	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1.595	*	589
hydromagnesite	水菱镁矿	$3\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1.527	*	589
hydroxypropyl cellulose	氢氧丙酸纤维素		1.337	*	589
ice Cylinders	冰,油缸冰	$\text{H}_2\text{O}$	1.308	*	589

表 D.2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
illite (clay)	伊利石,粘土		1.54~1.61	*	589
iodyrite	碘银矿	AgI	1.21	*	589
iolite	基青石		1.548	*	589
iridium	铱	Ir	1.810	*	443
iridium	铱	Ir	2.400	*	590
iridium	铱	Ir	2.690	*	729
iridium	铱	Ir	2.720	*	886
iron	铁	Fe	2.120	*	443
iron	铁	Fe	2.800	*	590
iron	铁	Fe	1.7	1.8	668
iron	铁	Fe	2.980	*	729
iron	铁	Fe	3.120	*	886
iron oxide magnetite	磁铁矿,四氧化三铁 锈层	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2.42	*	589
iron perchlorate	氯酸铁	Fe(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1.493	*	589
iron oxide	氧化亚铁	FeO	2.32	*	589
iron sulfate	硫酸铁	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	1.814	*	589
iron sulfate	硫酸铁	FeSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	1.533	*	589
ivory	象牙		1.54	*	589
jadeite	翡翠,硬玉		1.660~1.668	*	589
jarosite	氢氧硫酸铁钾	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1.72~1.82	*	589
jasper	碧玉		1.54	*	589
jet	煤玉,黑色大理石		1.66	*	589
kalinite	硫酸铝钾	KAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 12H <sub>2</sub> O	1.454	*	589
kaliophilite	钾霞石	KAlSiO <sub>4</sub>	1.532	*	589
kaolin clay	陶瓷粘土		1.64	*	589
kaolinite	高岭石(土)	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	1.53~1.57	*	589
kieserite	水(硫)矾	MgSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	1.52~1.58	*	589
kornerupine	柱晶石、钠柱晶石		1.665~1.682	*	589
krausite	钾铁矾	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 24H <sub>2</sub> O	1.482	*	589
kunzite	紫锂辉石		1.665~1.68	*	589
labradorite (feldspar)	曹灰长石,拉长岩(长 石)		1.565	*	589

表 D.2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
lanarkite	黄铅矿	PbSO <sub>4</sub> · PbO	1.93	*	589
lansfordite	碳酸镁	MgCO <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	1.456	*	589
lanthanum fluoride	氟化镧	LaF <sub>3</sub>	1.613	*	435
lanthanum fluoride	氧化镧	LaF <sub>3</sub>	1.602	*	546
lanthanum sulfate	硫酸镧	La <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 9H <sub>2</sub> O	1.564	*	589
lapis (gem)	天青石(珍宝)		1.5	*	589
lawrencite	氯化铁	FeCl <sub>2</sub>	1.567	*	589
lazulite	天蓝石		1.615~1.645	*	589
lead	铅	Pb	2.6	*	589
lead dioxide	二氧化铅	PbO <sub>2</sub>	2.3	*	589
lead dithionate	过二硫酸铅	PbS <sub>2</sub> O <sub>6</sub> · 4H <sub>2</sub> O	1.635	*	589
lead nitrate	硝酸铅	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.782	*	589
lechatelierite	二氧化硅	SiO <sub>2</sub>	1.45	*	589
leonite	钾镁矾	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · MgSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	1.483	*	589
leucite	白榴石	KAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1.508	*	589
lead orthophosphate	正磷酸铅	Pb(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.97	*	589
lead oxides	多氧化铅	PbO, Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , PbO <sub>2</sub>	2.3~2.7	*	589
lime	石灰, 氧化钙	CaO	1.838	*	589
lithium acetate	醋酸锂	LiC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.43~1.54	*	589
lithium carbonate	碳酸锂	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.42	*	589
lithium fluoride	氟化锂	LiF	1.399	*	400
lithium fluoride	氟化锂	LiF	1.394	*	500
lithium fluoride	氟化锂	LiF	1.392	*	600
lithium fluoride	氟化锂	LiF	1.390	*	700
lithium fluoride	氟化锂	LiF	1.389	*	800
lithium fluoride	氟化锂	LiF	1.388	*	900
lithium fluosilicate	氟硅酸锂	Li <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.30	*	589
lithium hydroxide	氢氧化锂	LiOH	1.46	*	589
lithium oxide	氧化锂	Li <sub>2</sub> O	1.64	*	589
lithopone	锌钡白, 硫化亚铅		1.84	*	589
magnesite	碳酸镁, 菱镁矿	MgCO <sub>3</sub>	1.51~1.78	*	589
magnesium acetate	醋酸镁	Mg(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	1.4	*	589
magnesium chloride	氯化镁	MgCl <sub>2</sub>	1.675	*	589

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
magnesium fluoride	氟化镁	MgF <sub>2</sub>	1.390	*	400
magnesium fluoride	氟化镁	MgF <sub>2</sub>	1.385	*	546
magnesium fluoride	氟化镁	MgF <sub>2</sub>	1.382	*	700
magnesium silicate	硅酸镁	MgSiO <sub>3</sub>	1.65	*	589
magnesium sulfate	硫酸镁	MgSO <sub>4</sub>	1.568	*	589
magnesium sulfate	硫化镁	MgS	2.271	*	589
magnesium sulfide	亚硫酸镁	MgSO <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1.511	*	589
magnetite	磁铁矿	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2.42	*	589
malachite	碳酸氢氧铜	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> )	1.65~1.91	*	589
manganese	锰	Mn	2.110	*	451
manganese	锰	Mn	2.470	*	582
manganese fluosilicate	氟硅酸锰	MnSiF <sub>6</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1.357	*	589
manganese pyrophosphate	焦磷酸锰	Mn <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	1.695	*	589
manganese sulfate	硫酸锰	MnSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	1.495	*	589
manganese	锰	Mn	2.700	*	756
manganese	锰	Mn	2.970	*	892
manganese tantalate	钽酸锰	Mn(TaO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2.22	*	589
mascagnite	硫酸铵	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.52~1.53	*	589
massicot	铅黄,氧化铅	PbO	2.51	*	589
meerschaum	海泡石		1.53	*	589
melamine	密胺,三聚氰(酰)胺		1.87	*	589
melanterite	硫酸亚铁	Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	1.47	*	589
mercallite	硫酸氢钾	KHSO <sub>4</sub>	1.480	*	589
mercury	汞	Hg	1.8	*	589
mercury chloride	氯化汞	HgCl <sub>2</sub>	1.8	*	589
mercury iodide	碘化汞	HgI <sub>2</sub>	2.5	*	589
mervnite / merwnite	镁硅钙石	3CaOMgOSiO <sub>2</sub>	1.708	*	589
mica	云母		1.53~1.70	*	589
microcline	微斜长石	K <sub>2</sub> OAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 6SiO <sub>2</sub>	1.522	*	589
moissanite	碳化硅	SiC	2.65~2.69	*	589
molybdenum	钼	Mo	3.080	*	443
moldavite	莫尔道熔融石,黑地蜡		1.5	*	589
molybdenum	钼	Mo	3.680	*	590
molybdenum	钼	Mo	3.840	*	729

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
molybdenum	钼	Mo	3.150	*	886
monoazite	正磷酸铈,独居石,磷铈镧矿	CePO <sub>4</sub>	1.795	*	589
moss agate	藓纹玛瑙		1.54~1.55	*	589
muscovite	优质白云母	K <sub>2</sub> O · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 6SiO <sub>2</sub>	1.551	*	589
nantokite	铜盐	CuCl	1.93	*	589
naphthaleneformaldehyde rubber	甲醛萘橡胶		1.696	*	589
natrolite	钠沸石		1.48~1.493	*	589
neodymium sulfate	硫酸钕	Nd <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 8H <sub>2</sub> O	1.41	*	589
nephelite	霞石	Na <sub>7</sub> O · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub>	1.537	*	589
nephrite	软玉		1.6~1.63	*	589
nesquehonite	碳酸镁	MgCO <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O	1.495	*	589
nickel	镍	Ni	1.630	*	443
nickel	镍	Ni	1.850	*	590
nickel	镍	Ni	2.280	*	729
nickel	镍	Ni	2.650	*	886
Niobium	铌	Nb	2.660	*	451
niobium	铌	Nb	2.890	*	605
niobium	铌	Nb	2.360	*	751
niobium	铌	Nb	1.760	*	918
nitrobarite	硝酸钡	Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.57	*	589
obsidian	黑曜石		1.48~1.51	*	589
octahedrite anatase	二氧化钛	TiO <sub>2</sub>	2.554	*	589
oligoclase (feldspar)	少长石,(长石)		1.539~1.547	*	589
onyx	缟玛瑙		1.486~1.658	*	589
opal	蛋白石,猫眼石,乳色玻璃	SiO <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O	1.41~1.46	*	589
optical Sapphire	光蓝宝石	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.771	*	539
optical Sapphire	光蓝宝石	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.765	*	653
optical Sapphire	光蓝宝石	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.761	*	775
optical Sapphire	光蓝宝石	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.758	*	886
orthoclase	正长石	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.52~1.54	*	589
orthoclase feldspar	正长石(长石)		1.518~1.526	*	589

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
osmium (poly crystalline)	锇(多晶)	$\text{Os}$	5.070	*	443
osmium (poly crystalline)	锇(多晶)	$\text{Os}$	4.260	*	590
osmium (poly crystalline)	锇(多晶)	$\text{Os}$	3.700	*	729
osmium (poly crystalline)	锇(多晶)	$\text{Os}$	2.490	*	886
palladium	钯	$\text{Pd}$	1.290	*	443
palladium	钯	$\text{Pd}$	1.670	*	590
palladium	钯	$\text{Pd}$	2.000	*	729
palladium	钯	$\text{Pd}$	2.340	*	886
paraffin Oil	石蜡基石油		1.48	*	589
pearl	珍珠		1.530~1.686	*	589
pericase	氧化镁(方镁石)	$\text{MgO}$	1.735	*	589
peridot	橄榄石		1.654~1.690	*	589
peristetite/(Peristreite)	钠长石		1.525~1.536	*	589
perspex	有机玻璃		1.495	*	589
petalite	透锂长石		1.502	*	589
phenakite	似晶石, 硅铍石		1.65~1.67	*	589
phenol-formaldehyde resin	甲醛苯酚树脂		1.7	*	589
phosphorus white	白磷	$\text{P}_4$	2.144	*	589
plastic	塑料, 合成树脂		1.46~1.7	*	589
platinum	白金铂	$\text{Pt}$	1.830	*	443
platinum	铂	$\text{Pt}$	2.230	*	590
platinum	铂	$\text{Pt}$	2.2	2.1	663
platinum	铂	$\text{Pt}$	2.630	*	729
platinum	铂	$\text{Pt}$	3.100	*	886
polyacetal	聚(缩)醛(树脂)		1.51	*	589
polycarbonate	聚碳酸酯		1.59	*	687
polycarbonate resin	聚碳酸酯树脂		1.586	*	589
polyethylene	聚乙烯		1.51	*	589
polyethylene, high density	高密度聚乙烯		1.54	*	589
polyethylene, low density	低密度聚乙烯		1.51	*	589
polyhalite	杂卤石	$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.548	*	589
potassium acid oxalate	草酸钾	$\text{KHC}_2\text{O}_4$	1.382	*	589



表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
potassium acid oxalate-oxalic acid	乙二酸草酸钾	$\text{KHC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.56	*	589
potassium antimony tartrate	酒石酸锑钾	$\text{KSbC}_4\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.620	*	589
potassium bromide	溴化钾	KBr	1.572	*	486
potassium bromide	溴化钾	KBr	1.559	*	589
potassium bromide	溴化钾	KBr	1.556	*	643
potassium bromide	溴化钾	KBr	1.552	*	706
potassium carbonate	碳酸钾	$\text{K}_2\text{CO}_3$	1.531	*	589
potassium carbonate	碳酸钾	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.380	*	589
potassium carbonate	碳酸钾	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1.380	*	589
potassium Chloride	氯化钾	KCl	1.500	*	467
potassium Chlorate	氯酸钾	$\text{KClO}_3$	1.409	*	589
potassium Chloride	氯化钾	KCl	1.488	*	627
potassium Chloride	氯化钾	KCl	1.484	*	768
potassium Chromate	铬酸钾	$\text{K}_2\text{CrO}_4$	1.74	*	589
potassium dichromate	重铬酸钾	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	1.738	*	589
potassium disilicate	重硅酸钾	$\text{K}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	1.48~1.502	*	589
potassium fluoride	氟化钾	KF	1.363	*	589
potassium hydrocarbonate	碳酸氢钾	$\text{KHCO}_3$	1.482	*	589
potassium Iodide	碘化钾	KI	1.718	*	546
potassium Iodide	碘化钾	KI	1.677	*	589
potassium Iodide	碘化钾	KI	1.649	*	768
potassium iron sulfate	硫酸铁钾	$\text{KFe}(\text{SO}_4)_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	1.452	*	589
potassium iron sulfate	硫酸铁钾	$\text{KSO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.476	*	589
potassium metasilicate	硅酸钾	$\text{K}_2\text{SiO}_3$	1.502~1.528	*	589
potassium metaborate	硼酸钾		1.45	*	589
potassium oxalate	草酸钾, 乙二酸钾	$\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.440	*	589
potassium perchlorate	氯酸钾	$\text{KClO}_4$	1.471	*	589
potassium permanganate	高锰酸钾	$\text{KMnO}_4$	1.59	*	589
potassium phosphate	磷酸钾		1.50	*	589
potassium tetrasilicate	四硅酸钾	$\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.495~1.535	*	589
potassium thiocyanate	硫氰酸钾	KNCS	1.66	*	589
prase	绿石英		1.54~1.553	*	589
praseodymium sulfate	硫酸镨	$\text{Pr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	1.54	*	589

表 D.2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
prehnite	葡萄石		1.61~1.64	*	589
pyrochroite	氢氧化锰	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	1.723	*	589
pyrope	铝镁榴石		1.746	*	589
quartz	石英,水晶	$\text{SiO}_n$	1.54~1.55	*	589/768
quartz	石英,水晶	a- $\text{SiO}_2$	1.45~1.47	*	589
quartz	石英,水晶	c- $\text{SiO}_2$	1.48	*	589
quartz (natural $\text{SiO}_2$ )	石英,水晶(天然二氧化硅)	$\text{SiO}_2$	1.55	*	589
quartz (purple)	石英,水晶(紫色)		1.544~1.553	*	589
quartz (white, colorless)	石英,水晶(白色,无色)		1.544~1.553	*	589
quartz (crystal)	石英,水晶(晶体)	$\text{SiO}_2$	1.556	*	458
quartz (crystal)	石英,水晶(晶体)	$\text{SiO}_2$	1.552	*	515
quartz (crystal)	石英,水晶(晶体)	$\text{SiO}_2$	1.547	*	633
quartz (crystal)	石英,水晶(晶体)	$\text{SiO}_2$	1.543	*	755
quartz (yellow, golden)	石英,水晶(黄色,金黄色)		1.544~1.553	*	589
rhenum (single crystal $E \perp C$ )	铼(单晶)	Re	3.570	*	443
rhenum (single crystal $E \perp C$ )	铼(单晶)	Re	3.740	*	590
rhenum (single crystal $E \perp C$ )	铼(单晶)	Re	3.380	*	729
rhenum (single crystal $E \perp C$ )	铼(单晶)	Re	3.230	*	886
rhenum (single crystal $E // C$ )	铼(单晶)	Re	2.890	*	443
rhenum (single crystal $E // C$ )	铼(单晶)	Re	3.030	*	590
rhenum (single crystal $E // C$ )	铼(单晶)	Re	2.700	*	729
rhenum (single crystal $E // C$ )	铼(单晶)	Re	2.440	*	886
rhodium	铑	Rh	1.800	*	459
rhodium	铑	Rh	2.050	*	590
rhodium	铑	Rh	2.420	*	729
rhodium	铑	Rh	3.010	*	886
rhodolite	镁铁榴石		1.76	*	589
rhodonite	硅酸锰	$\text{MnSiO}_3$	1.733	*	589
rinneite	钾铁盐	$3\text{KCl} \cdot \text{NaCl} \cdot \text{FeCl}_2$	1.589	*	589
rock crystal	无色水晶,石英		1.544~1.553	*	589
rock salt	石盐	$\text{NaCl}$	1.544/1.541	*	589/640

表 D.2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
rubber	橡胶		1.591	*	589
rubidium bromide	溴化铷	RbBr	1.56	*	488
rubidium bromide	溴化铷	RbBr	1.55	*	590
rubidium bromide	溴化铷	RbBr	1.55	*	633
rubidium chloride	氯化铷	RbCl	1.5	*	488
rubidium chloride	氯化铷	RbCl	1.49	*	590
rubidium chloride	氯化铷	RbCl	1.49	*	633
rubidium fluoride	氟化铷	RbF	1.396	*	589
rubidium Iodide	碘化铷	RbI	1.67	*	488
rubidium Iodide	碘化铷	RbI	1.65	*	590
rubidium Iodide	碘化铷	RbI	1.64	*	633
ruby	红宝石,红玉	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.76~1.77	*	589/668
ruthenium (single crystal E⊥C)	钌(单晶)	Ru	2.990	*	443
ruthenium (single crystal E⊥C)	钌(单晶)	Ru	4.210	*	590
ruthenium (single crystal E⊥C)	钌(单晶)	Ru	5.120	*	729
ruthenium (single crystal E⊥C)	钌(单晶)	Ru	4.860	*	886
ruthenium (single crystal E//C)	钌(单晶)	Ru	2.540	*	443
ruthenium (single crystal E//C)	钌(单晶)	Ru	3.690	*	590
ruthenium (single crystal E//C)	钌(单晶)	Ru	4.420	*	729
ruthenium (single crystal E//C)	钌(单晶)	Ru	4.020	*	886
rutile	金红石	TiO <sub>2</sub>	2.56~2.90	*	589/690
sanidine	透长石,玻璃长石		1.522	*	559
sapphire	蓝宝石	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.774	*	458
sapphire	蓝宝石	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.764	*	590
sapphire	蓝宝石	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.757	*	755
sapphire	蓝宝石	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.752	*	980
scapolite	方柱石		1.54~1.56	*	589
scapolite (yellow)	方柱石(黄色)		1.555	*	589
scorodite	臭葱石	FeAsO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.765	*	589
selenium oxide	氧化硒	SeO <sub>2</sub>	1.76	*	589
serpentine	蛇纹石	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	1.53~1.57	*	589
shell	贝壳		1.53~1.686	*	589
sideite	碳酸铁	FeCO <sub>3</sub>	1.875	*	589
siderotil	硫酸铁	FeSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	1.526	*	589

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
silica	硅石, 二氧化硅	SiO <sub>2</sub>	1.466	*	450
silica	硅石, 二氧化硅	SiO <sub>2</sub>	1.458	*	600
silica	硅石, 二氧化硅	SiO <sub>2</sub>	1.454	*	750
silica	硅石, 二氧化硅	SiO <sub>2</sub>	1.452	*	900
silica	硅石(熔融的)	SiO <sub>2</sub>	1.46	*	589/644
silicon	硅	Si	4.2	0.1	589
silicon carbide	碳化硅	SiC	2.64~2.65	*	589/616
silicon nitride	氮化硅	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1.97	*	589
sillimanite	硅线石		1.658~1.678	*	589
silver	银	Ag	0.230	*	413
silver	银	Ag	0.270	*	620
silver	银	Ag	0.2	19.5	630
silver	银	Ag	0.270	*	827
silver bromide	溴化银	AgBr	2.33	*	476
silver bromide	溴化银	AgBr	2.313	*	496
silver bromide	溴化银	AgBr	2.27	*	550
silver bromide	溴化银	AgBr	2.25	*	600
silver bromide	溴化银	AgBr	2.24	*	650
silver bromide	溴化银	AgBr	2.205	*	781
silver nitrate	硝酸银	AgNO <sub>3</sub>	1.729	*	589
silver chloride	氯化银	AgCl	2.097	*	500
silver sulfate	硫酸银	Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.758	*	589
smaragdite	绿闪石		1.608~1.63	*	589
soda niter	硝酸钠	NaNO <sub>3</sub>	1.587	*	589
sodalite	方钠石		1.483	*	589
sodium	钠	Na	4.22	*	589
sodium acetate	乙酸钠	NaC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	1.464	*	589
sodium acid tartrate	酒石酸钠	NaHC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	1.53	*	589
sodium aluminum sulfate	硫酸铝钠	NaAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 12H <sub>2</sub> O	1.439	*	589
sodium borohydride	氢硼化钠	NaBH <sub>4</sub>	1.542	*	589
sodium bromide	溴化钠	NaBr	1.64	*	589
sodium Chloride	氯化钠	NaCl	1.541	*	640
sodium Chloride	氯化钠	NaCl	1.537	*	760
sodium Chloride	氯化钠	NaCl	1.534	*	903

表 D.2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
sodium Cyanide	氰化钠	NaCN	1.452	*	589
sodium dithionate	连二硫酸钠	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.482	*	589
sodium fluoride	氟化钠	NaF	1.328	*	486
sodium fluoride	氟化钠	NaF	1.325	*	589
sodium fluoride	氟化钠	NaF	1.324	*	707
sodium fluoride	氟化钠	NaF	1.322	*	912
sodium fluosilicate	氟硅酸钠	Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	1.312	*	589
sodium hypophosphate	连二磷酸钠	Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>6</sub> · 10H <sub>2</sub> O	1.477	*	589
sodium iodide	碘化钠	NaI	1.774	*	589
sodium iron sulfate	硫酸铁钠	3Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1.558	*	589
sodium metaaluminate	铝酸钠	NaAlO <sub>2</sub>	1.566	*	589
sodium orthophosphate	正磷酸钠	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	1.446	*	589
sodium perchlorate	氯酸钠	NaClO <sub>4</sub>	1.460	*	589
sodium sulfate (anhydrous)	硫酸钠	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.485	*	589
sodium sulfite	亚硫酸钠	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	1.564	*	589
sodium tetraborate	四硼酸钠	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	1.50	*	589
sodium thioarsenate	硫代砷酸钠	Na <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub> · 8H <sub>2</sub> O	1.680	*	589
sodium uranyl acetate	醋酸铀铈钠	(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> NaUO <sub>2</sub>	1.501	*	589
soot	碳黑,煤烟		1.7	0.7	589
spessartite	斜蝗石,锰铝榴矿		1.810	*	589
spinel	尖晶石	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.71~1.72	*	589/656
spodumene	锂辉石		1.65~1.68	*	589
starch	淀粉		1.53	*	589
stichtite	铬磷镁矿		1.52~1.55	*	589
stolzite	钨铅矿	PbWO <sub>4</sub>	2.269	*	589
strontium carbonate	碳酸锶	SrCO <sub>3</sub>	1.61	*	589
strontium chloride	氯化锶	SrCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.594	*	589
strontium fluoride	氟化锶	SrF <sub>2</sub>	1.442	*	589
strontium fluoride	氟化锶	SrF <sub>2</sub>	1.439	*	550
strontium hydrosulfide	氢硫化锶	Sr(HS) <sub>2</sub>	2.107	*	589
strontium nitrite	亚硝酸锶	Sr(NO <sub>2</sub> ) · H <sub>2</sub> O	1.588	*	589
strontium oxide	氧化锶	SrO	1.810	*	589
sugar (sucrose)	糖(蔗糖)		1.54	*	589

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
sugar of lead	糖化铅, 铅结晶	$\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1.567	*	589
sulfur	硫	$\text{S}_8$	1.957	*	589
sulfur	硫	S	1.96~2.25	*	589
sulfur dichloride	二氯化硫	$\text{SCl}_2$	1.557	*	589
sulfur monochloride	一氯化硫	$\text{S}_2\text{Cl}_2$	1.666	*	589
sylvite	钾盐, 氯氯化钾	KCl	1.490	*	589
synthetic emerald (flux)	合成翡翠(精炼)		1.561~1.564	*	589
synthetic emerald (hydro)	合成翡翠(氯化)		1.568~1.573	*	589
szmikite	硫酸锰	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.562	*	589
tantalum	钽	Ta	2.850	*	443
tantalum	钽	Ta	2.100	*	590
tantalum	钽	Ta	1.240 0	*	729
tantalum	钽	Ta	1.040	*	886
tapiolite	钽酸铁	$\text{Fe}(\text{TaO}_3)_2$	2.27	*	589
tellurium	碲	Te	1.002	*	589
tenorite	黑铜矿	CuO	2.63	*	589
thallium bromide	溴化铊	TlBr	2.652	*	438
thallium bromide	溴化铊	TlBr	2.418	*	589
thallium bromide	溴化铊	TlBr	2.35	*	750
thallium bromide-Thallium chloride (KRS-6 Crystal)	溴化铊-氯化铊	TlBr-TlCl	2.329	*	600
thallium bromide-Thallium chloride (KRS-6 Crystal)	溴化铊-氯化铊	TlBr-TlCl	2.298	*	700
thallium bromide-Thallium chloride (KRS-6 Crystal)	溴化铊-氯化铊	TlBr-TlCl	2.266	*	800
thallium bromide-Thallium chloride (KRS-6 Crystal)	溴化铊-氯化铊	TlBr-TlCl	2.251	*	900
thallium bromide-Thallium iodide (KRS-5 Crystal)	溴化铊-碘化铊	TlBr-TlI	2.681	*	540
thallium Chloride	氯化铊	TlCl	2.4	*	436
thallium Chloride	氯化铊	TlCl	2.247	*	589
thallium Chloride	氯化铊	TlCl	2.198	*	750
thermonatrite	碳酸钠(水碱)	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.506	*	589
thomsonite	杆沸石		1.53	*	589
tiger eye	虎眼		1.544~1.553	*	589

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ $\mu\text{m}$
			实部	虚部	
titanium dioxide	二氧化钛	TiO <sub>2</sub>	2.6~2.9	*	589
titanium tetrachloride	四氯化钛	TiCl <sub>4</sub>	1.61	*	589
titanium (polycrystalline)	钛(多晶)	Ti	2.540	*	729
titanium (polycrystalline)	钛(多晶)	Ti	1.680	*	443
titanium (polycrystalline)	钛(多晶)	Ti	2.010	*	590
titanium (polycrystalline)	钛(多晶)	Ti	3.170	*	886
topaz	黄玉(矿), 黄晶	Al <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	1.61~1.64	*	589
topaz (blue)	黄晶(蓝色)	Al <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	1.61	*	589
topaz (white, colorless)	黄晶(白色, 无色)	Al <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	1.619~1.627	*	589
topaz (pink, yellow)	黄晶(粉红, 黄色)	Al <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	1.62	*	589
topaz (white)	黄晶(白色)	Al <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (OH, F) <sub>2</sub>	1.63	*	589
tourmaline	电石		1.616~1.652	*	589
tremolite	透闪石		1.6~1.62	*	589
tridymite	氧化硅	SiO	1.469	*	589
tridymite	氧化硅	SiO	1.47~1.48	*	589
tungsten	钨	W	3.310	*	443
tungsten	钨	W	2.76	1.0	578
tungsten	钨	W	3.540	*	590
tungsten	钨	W	3.840	*	729
tungsten	钨	W	3.290	*	886
turquoise	绿松石		1.61~1.65	*	589
turquoise (gem)	绿松石(金石玉)		1.61	*	589
ulexite	硼钠锈石, 硼钠解石		1.49~1.52	*	589
urea formaldehyde	脲(甲醛)		1.43	*	589
vanadium	钒	V	1.610	*	443
vanadium	钒	V	2.310	*	590
vanadium	钒	V	2.520	*	729
vanadium	钒	V	2.480	*	886
vanadium pentaoxide	五氧化二钒	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.46	*	589
variscite	磷铝石		1.55~1.59	*	589
vaterite	碳酸钙	CaCO <sub>3</sub>	1.55~1.65	*	589
verdigris	铜绿, 碱性醋酸铜	Cu(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	1.545	*	589
vivianite	蓝铁矿		1.58~1.627	*	589
wardite	水磷铝钠石		1.59~1.599	*	589

表 D. 2(续)

英文名称	中文名称	化学式/特征描述	折射率		波长/ μm
			实部	虚部	
washing soda	晶(洗濯)碱	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	1.405	*	589
witherite	毒重石, 碳酸钡	$\text{BaCO}_3$	1.53~1.68	*	589
wollastonite	硅酸钙	$\text{CaSiO}_3$	1.62~1.65	*	589
wurtzite	纤维锌矿, 硫化锌	$\text{ZnS}$	2.35	*	589
yeast	酵母, 发酵粉		1.49~1.53	*	589
yttrium sulfate	硫酸钇	$\text{Y}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	1.543	*	589
zinc borate (ZB-467)	硼酸锌		1.59	*	589
zinc acetate	醋酸锌	$\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.494	*	589
zinc bromate	溴酸锌	$\text{Zn}(\text{BrO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.545	*	589
zinc chloride	氯化锌	$\text{ZnCl}_2$	1.681	*	589
zinc oxide	氧化锌	$\text{ZnO}$	2.029	*	589
zinc selenide	硒化锌	$\text{ZnSe}$	2.599	*	620
zinc selenide	硒化锌	$\text{ZnSe}$	2.542	*	740
zinc selenide	硒化锌	$\text{ZnSe}$	2.503	*	900
zinc sulfide	硫化锌	$\text{ZnS}$	2.449	*	467
zinc sulfide	硫化锌	$\text{ZnS}$	2.347	*	643
zinc sulfide	硫化锌	$\text{ZnS}$	2.317	*	780
zinc sulfide	硫化锌	$\text{ZnS}$	2.302	*	894
zinc sulfide	硫化锌	$\text{ZnS}$	2.297	*	940
zincite	红锌矿		2.008	*	589
zircon	硅酸锆, 锆石	$\text{ZrSiO}_4$	1.92~2.02	*	589
zirconium nitrate	硝酸锆	$\text{Zr}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.60	*	589
zirconium silicate	硅酸锆		1.97	*	589
zirconium (polycrystalline)	锆(多晶)	Zr	1.400	*	443
zirconium (polycrystalline)	锆(多晶)	Zr	1.990	*	590
zirconium (polycrystalline)	锆(多晶)	Zr	2.680	*	729
zirconium (polycrystalline)	锆(多晶)	Zr	3.100	*	886
zoisite	黑幼帘石		1.691~1.704	*	589