

平面分步透镜的原理和它在太阳能利用中的应用

蒋均平

(陕西省西安市第30中学)

一、概述

平面分步透镜又叫“菲涅尔透镜”，是按菲涅尔原理用普通玻璃或透明塑料浇铸或压延而成。与旋转抛物面聚光镜等常用的太阳能设备比较，它加工容易，成本较低，是太阳能利用中一种有潜力的集光装置。

二、平面分步透镜的光学原理

光线通过三棱镜，两次透过分界面 PA 、 PB (见图1)， α_1 、 α_2 分别表示入射角， γ_1 、 γ_2 分别表示折射角， φ

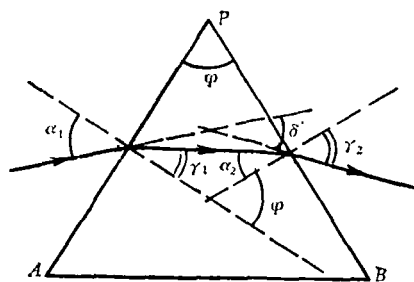


图1 棱镜对光的偏折作用

表示棱镜顶角， δ 表示光线偏向角，由几何光学原理知：

$$\delta = \varphi - [180^\circ - (\alpha_1 + \gamma_2)] = \alpha_1 + \gamma_2 - \varphi. \quad (1)$$

顶角 φ 很小的棱镜叫薄棱镜，平面分步透镜和一般光学透镜可以看成是由许多薄棱镜构成的，其偏向角近似公式如下：

$$\delta_{\text{薄}} = (n - 1)\varphi. \quad (2)$$

为了计算和加工简便，设透镜的一个表面为平面，图2为平面分步透镜的原理剖析图， O 表示透镜光心， F 表示透镜焦点， $f = OF$ 为透镜焦距， R_A 、 R_B 分别表示距光心不同距离 A 、 B 两小棱镜到光心的距离， θ_A 、 θ_B 分别表示两小棱镜的加工顶角。因此：

(1) 对焦点式平面分步透镜而言，每一个小棱镜构成一个环带透镜（即分步环带），通过环带的平行

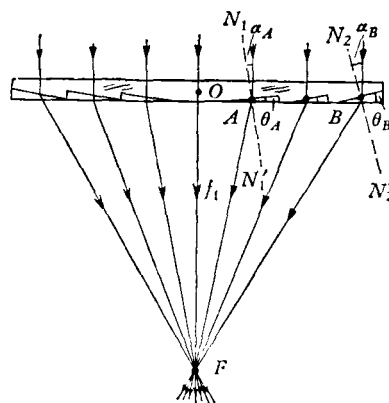


图2 平面分步透镜原理剖析图

光以相同的偏向角向光轴方向偏折并会聚于 F 点（近似）。

(2) 距光心不同距离处，两环带透镜 A 、 B ，如要求透过光线都会聚于同一焦点，则要求 A 、 B 两棱镜有不同的顶角 θ_A 、 θ_B ，且 θ_B 大于 θ_A 。

(3) 使用折射率不同的透明材料，要求不同的焦距和各小棱镜到光心的不同距离，这三个因素直接影响棱镜顶角（即制作棱镜的加工角）的大小。

(4) 决定 θ （加工角）和材料折射率 n ，小棱镜到光心的距离 R 与透镜焦距 f 之间的函数关系及相应的曲线，是研究和设计平面分步透镜的关键，也是本文所要讨论的重要问题之一。

三、平面分步透镜公式及 $f(R)$ 曲线

1. 性质简析

为了研究平面分步透镜的性质，作如图5所示的透镜原理局部分析图。图中 I 表示通过棱镜 A 的一条光线，折射后通过焦点。 NN' 为通过 A 点的法线， θ 为棱镜 A 的顶角。由几何作图知：

$$\theta = \alpha \quad (\text{对应边相互垂直}). \quad (3)$$

式(3)表明组成平面分步透镜的每一个小棱镜，其顶角（加工角）大小为该处通过界面光线的入射角。

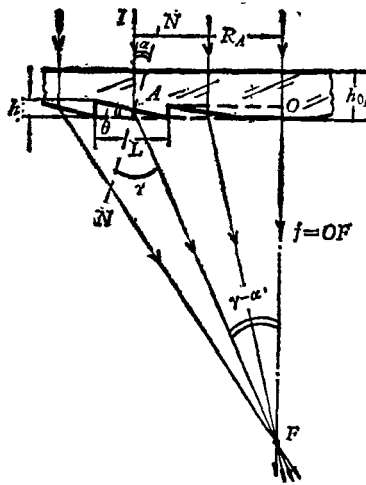


图3 透镜原理局部分析图

在直角三角形 OAF 中:

$$\angle FAO = \alpha + (90^\circ - \gamma) = 90^\circ - (\gamma - \alpha),$$

$$\angle AFO = \gamma - \alpha, \quad (4)$$

$\gamma - \alpha$ 为偏向角。式(4)表明通过平面分步透镜任一棱镜光线的偏向角为该处折射角和入射角之差,并有函数式如下:

$$\operatorname{tg}(\gamma - \alpha) = \frac{R}{f}, \quad (4')$$

式(4)'表明,通过平面分步透镜上任何一点的光线,折射角和入射角之差的正切函数值,为该点到光心距离 R 和焦距 f 之比。

由光折射定律知:

$$\frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} = n, \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可求得:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{n - \cos(\gamma - \alpha)}, \quad (6)$$

将(4)式代入可写成:

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\sin \left(\operatorname{tg}^{-1} \frac{R}{f} \right)}{n - \cos \left(\operatorname{tg}^{-1} \frac{R}{f} \right)} \right]. \quad (6')$$

式(6)和(6)'为 $\theta = f(n, R, f)$ 形式的多元函数。我们称式(6)和(6)'为平面分步透镜公式。

通过三角函数变换,平面分步透镜公式还可以简化成:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{n \sqrt{f^2 + R^2} - f}, \quad (7)$$

或

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{R}{n \sqrt{f^2 + R^2} - f}. \quad (7')$$

式(7)和(7)'是平面分步透镜公式的另一表达式。若令

$$\frac{R}{f} = K,$$

K 是组成平面分步透镜的任一棱镜到光心距离与透镜焦距之比值,是研究透镜的重要参量之一。代入 K 值后,透镜公式还可以简化成:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{K}{n \sqrt{1 + K^2} - 1}, \quad (8)$$

或

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{K}{n \sqrt{1 + K^2} - 1}. \quad (8')$$

式(8)和(8)'是平面透镜公式的第三种表达式,与前两种多元函数相比,式(8)和(8)'中变量减少了,使进一步研究平面分步透镜效率的问题大为简化。

2. 平面分步透镜的 $\theta = f(R)$ 曲线及透镜设计函数表

在设计制造平面分步透镜时,首先考虑使用什么材料,对确定的玻璃和有机玻璃,折射率 n 为确定常数。如要求透镜有一定焦距 f 值,函数 $\theta = f(n, R, f)$

表1 普通玻璃的 $R-\theta$ 关系表

材 料	普通玻璃, 折射率 $n_1 = 1.51$, 焦距 $f_1 = 1000$ 毫米								
R (毫米)	0	100	200	300	400	500	600	700	800
θ (或 α)	0°	$10^\circ 56' 10''$	$20^\circ 19' 35''$	$27^\circ 29' 32''$	$32^\circ 33' 52''$	36°	$38^\circ 15' 20''$	$39^\circ 41' 56''$	

表2 有机玻璃的 $R-\theta$ 关系

材 料	有机玻璃, 折射率 $n_2 = 1.485$, 焦距 $f_2 = 300$ 毫米								
R (毫米)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
θ (或 α)	0°	$18^\circ 14' 54''$	$30^\circ 31' 29''$	$37^\circ 8' 6''$	$40^\circ 20' 56''$	$41^\circ 46' 10''$	$42^\circ 16' 15''$	临界角	光全反射

可简化成 $\theta = f(R)$ 的形式, 现以普通玻璃 ($n = 1.51$) 材料, 设计 $f = 1000$ 毫米的太阳灶用平面分步透镜为例, 讨论 $\theta = f(R)$ 曲线, 代入上述数值后:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{R}{1.51 \sqrt{10^6 + R^2} - 10^3}, \quad (R \text{ 的单位为毫米})$$

R 和 θ 的关系参阅表 1 和表 2.

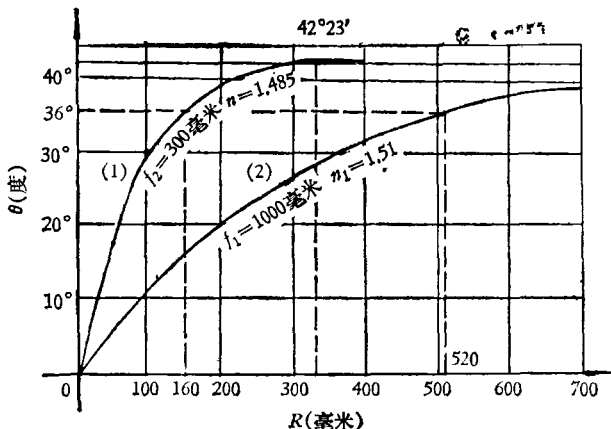


图 4 平面分步透镜 $\theta = f(R)$ 曲线

比较上述表 1 和表 2, 我们可作出平面分步透镜公式 $\theta = f(R)$ 曲线图, 如图 6. 由图 6 中可知:

(1) 加工角 θ 有一定极值, 并应小于材料的临界角.

(2) 当 $\theta \approx 36^\circ$ 时, $K = \frac{R}{f} \approx 0.5 - 0.6$, 在此范围内, 随 ΔR 增加, θ 增量 $\Delta\theta$ 变化较大, 这不仅在制做上方便, 且各小棱镜有较大的透射系数, 所以透镜效率比较高.

(3) 当 $\theta \rightarrow$ 临界角时, R 有最大的极值:

$$R_{\max} = f \sqrt{n^2 - 1},$$

即 $K = \frac{R}{f}$ 的极大值为:

$$K_{\max} = \sqrt{n^2 - 1} \approx 2.2.$$

(4) 当 $\theta =$ 临界角时, 初步研究表明, 焦点式平面分步透镜, 在理想加工情况下, 理论效率约 50%.

3. 平面分步透镜设计函数表

我们以平面分步透镜公式为基础, 设计了一定规格的表式, 应用电子计算机推算制作了平面分步透镜设计函数表, 见表 3.

应用上述函数图表, 进行平面分步透镜理论研究或设计特别方便, 同时, 我们还可以用绘制半导体元件或电子管特性曲线族的方法, 设计绘制不同透明材料, 不同焦距的平面分步透镜特性曲线族, 连同上述的函数图线和函数图表, 编成平面分步透镜设计手册, 作为研究和设计平面分步透镜的参考资料也是很方便的.

物理

表 3 平面分步透镜设计函数表

透镜公式	$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{R}{n \sqrt{f^2 + R^2} - f} \right]$	材 料	普 通 玻 璃	折 射 率	$n = 1.51$
R (毫米)	$f_1 = 1000$ 毫米	$f_2 = 400$ 毫米	$f_3 = 300$ 毫米		
1	0° 6' 44"	0° 16' 51"	0° 22' 28"		
2	0° 13' 29"	0° 33' 42"	0° 44' 56"		
3	0° 20' 13"	0° 50' 33"	1° 7' 23"		
4	0° 26' 58"	1° 7' 23"	1° 29' 50"		
⋮	⋮	⋮	⋮		
321	28° 43' 4"	40° 36' 21"	41° 27' 6"		
⋮	⋮	⋮	大于临界角		
440	34° 6' 25"	41° 28' 0"	—		
⋮	⋮	大于临界角	—		
n	$\theta = f(R)$	—	—		

四、设计平面分步透镜的几点注意事项

设计生产平面分步透镜时, 要考虑的问题涉及范围很广, 如透镜的具体应用和焦距的选择; 材料的成本; 机械性能和加工方法; 确定透镜的宽度(或直径)与焦距的适当比值以获得最佳的透镜效率; 决定组成透镜每一个小棱镜的宽度和加工深度以考虑用材的厚度等. 概括说明如下:

1. 透镜材料的选择

不同的透明材料有不同的折射率, 这一点首先要考虑. 材料的来源和成本, 决定了平面分步透镜的经济指标. 材料的化学和物理性质直接影响着生产透镜的工艺方法和透镜使用的条件. 还要考虑透镜长期在阳光下照射的抗老化能力. 以玻璃和有机玻璃为例比较: 有机玻璃, $n_1 = 1.485$, 软化温度 100—120°C, 易于模压加工, 但抗老化性能差, 成本也较贵. 普通玻璃, $n_2 = 1.51$, 软化温度 600°C 以上, 成型加工在较高温度下进行, 制作较困难. 但玻璃成本低, 又有透光性能好, 耐磨和不易老化等优点, 所以它是制作平面分步透镜比较合适的材料. 近几年来, 塑料工业发展很快, 研制在性能等多方面能兼顾玻璃和有机玻璃的优点, 降低成本, 是研究透镜材料的方向.

2. 决定透镜的宽度(或直径)与焦距的适当比例

通过对组成平面分步透镜的各小环带棱镜的深入研究, 我们知道: (1) 不同的环带棱镜对太阳光有不同的透射系数; (2) 随着棱镜相对光心距离的增大, 透射系数不断减小; (3) 当加工角 θ 接近材料临界角时, 透射系数接近为“0”; (4) 经初步研究表明: 当 $\theta = 36^\circ$ 时, $K = \frac{R}{f}$ 在 0.5—0.6 之间, $\frac{D}{f} = 1.0 - 1.2$, 整个面积内, 平面分步透镜在理论上平均透射系数达

80—90%左右。盲目追求 $\frac{D}{f}$ 比值达最大值(即

$$\frac{D_{\max}}{f} \approx 2.2$$

左右),除有制作上的困难外,平面分步透镜理论上的平均效率降低到50%左右。通过以上讨论,我们认为 $\frac{D}{f} = 1.0-1.1$ 制作平面分步透镜较合适。

3. 选择适当的棱镜(或环带)宽度和加工深度

制作平面分步透镜的材料厚度,以 h_0 表示。用 $h_0 \leq 1$ 毫米的有机材料压制的圆形平面分步透镜,外观像密纹唱片,称为薄膜透镜。用玻璃浇铸或压延法生产的平面分步透镜, $h_0 \geq 3$ 毫米。

我们用 h 表示小棱镜的加工深度, L_A 表示任一处小棱镜的宽度。考虑到透镜作成后的机械强度,我们取两者关系为: $h \leq \frac{2}{5} h_0$, 即加工棱镜的深度以不超过平面透镜总厚度的五分之二为合适。在此条件下:

$$L_A \leq \frac{h}{\operatorname{tg} \theta} = \frac{2h_0}{5 \operatorname{tg} \theta}. \quad (9)$$

从式(7)可知,当 R 变化时,不仅 θ 变化, L_A 也变化;要求 $h \leq \frac{2}{5} h_0$ 时, L_A 随着 R 的增大而不断减小。

五、结 语

用平面分步透镜作太阳能利用的集光装置设计,与其它同类型集光装置相比较,有以下优点:

(1) 它有“大、薄、轻”的特点。“大”,平面分步透镜可以作成很大的采光面积;“薄和轻”,使集热器重量减少到其它透镜的 $1/3-1/5$ 。重量的减轻,也相应降低了支架的成本,且易实现太阳自动跟踪。

(2) 便于安装,能抗形变,所以效果稳定,使用方便。

(3) 材料来源广,易模压成型,适于大批生产,如能分块制作后,组装成面积很大的集热器,使太阳能利用装置成本大为降低。

(4) 与一般“热箱式”集热器相比,聚焦式集热器有使用温度高,集热效率高,用途广的优点。

火花光源所激发的高次电离光谱及其应用

韦 钦

(中南矿冶学院物理教研室)

火花光源所激发的高次电离光谱,通常都在 $6-7000 \text{ \AA}$ 的光谱区域内。它们的电离次数达 $2-17$ 次甚至更高,本文将讨论这些离子谱线的产生和应用。

自从 1927 年真空紫外光谱区域内第一台掠入射凹面光栅摄谱仪的研制成功,研究高次电离离子光谱就成为人们感兴趣的课题。然而,由于技术上的困难,它的发展是缓慢的。但是,随着科学技术的发展,近十年来,这一研究领域相当活跃。在真空紫外区域内,高次电离离子光谱应用于天体物理学要归功于 I. S. Bowen^[1],他提出而且证明了许多星云谱线起源于电离度达 15 次之高的原子的亚稳态能级的禁介跃迁。在受控热核反应中高温等离子体的诊断、辐射能量损失的研究中,高次电离离子光谱也是不可缺少的手段。特别是通过加速器使离子束加速并通过薄膜的束-箔光谱,也是高次电离离子光谱学研究的重要方面。高次电离光谱在定量分析中的应用也有许多优越性^[2-4]。选用了高次电离谱线作分析线对,具有高速、准确、干扰小,对不同基体来用唯一的工作曲线分析杂质元素

的可能性等等优点。目前,在 2000 \AA 以上的波段范围部份元素的高次电离谱线在通常谱线表中都可以找到。而在 $6-2000 \text{ \AA}$ 区域内的谱线表已经作出^[1]。这对高次电离离子光谱研究和扩大它的应用范围,提供了有利的条件。

一、火花光源和高次电离谱线的产生

高次电离谱线研究在波长 $6-2000 \text{ \AA}$ 的真空紫外区做了大量的工作。在真空紫外区域内的真空火花、滑动火花、三电极真空火花及可见光谱区域内的常用的弗氏火花光源都可以获得大量的各种元素的高次电离离子光谱。近年来,采用激光火花,束箔(Beam-Foil)光源,同样可以获得电离度很高的谱线。在真空紫外火花光源中,采用低电感,如几十 nH、高电压,如几十 kV、大电容,如几十 μF 可以获得大量的高次电离谱线,甚至可以在实验室里复制研究太阳光谱的工作,得到像: Fe XVIII, YIX-XIII, Zr X-XIV, Nb XI-XV,