

国产地球辐射表长波滤光罩性能的测试研究*

王炳忠

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

滤光罩是地球辐射表的关键部件, 其性能直接影响着该仪器的性能与质量. 利用 LOW-TRAN 7 和国产各种滤光罩实测的光谱透射比数据, 对不同的模式大气下各滤光罩有效透射比等性能指标进行计算, 并与 Eppley 罩的研究情况作了对比. 结果表明, 国产罩的各项性能指标并不次于 Eppley 罩.

关键词: 地球辐射表 长波滤光罩 性能测试

引 言

地球辐射表的透过长波截止短波的滤光罩是该仪器的关键部件. 除了添加测量温度的热敏电阻、辐射补偿电路和单罩与双罩在结构上的差异外, 其他方面与总日射表并无不同.

在开始研制地球辐射表的滤光罩时, 原则地提出几项技术指标: ①短波端的截止波长为 $3 \sim 4 \mu\text{m}$, 截止曲线的陡度越陡越好; ②透过长波的波长范围 $> 50 \mu\text{m}$; ③整个透射曲线的透射比越高越好.

研制出来的滤光罩与其他部件组合成的地球辐射表, 经与 Eppley 地球辐射表平行观测表明, 除灵敏度略低外, 其余性能未显异常.

1 透射比定义

透射比可具体地区分为光谱透射比、平均透射比和有效透射比 3 种.

$$\text{光谱透射比: } \tau(\lambda) = \frac{E_{\lambda}^*}{E_{\lambda}} \quad (1)$$

$$\text{平均透射比: } \bar{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i(\lambda) \quad (2)$$

有效透射比:

$$\bar{\tau}_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} \cdot \tau(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} d\lambda = E^* / E \quad (3)$$

* 本项研究获国家科技部攀登-B 项目“青藏高原地-气系统物理过程及其对全球和中国灾害性天气影响的观测和理论研究”资助.

1999-03-10 收到, 1999-05-19 收到修改稿.

其中 E_{λ} 为波长 λ 的透射辐射能通量, E_{λ} 为波长 λ 的入射辐射能通量。

由此可知, 光谱透射比是所有透射比的基础. 平均透射比实际上是某一波段光谱透射比的算术平均值, 它可供对同一类型的滤光器进行比较. 至于有效透射比, 由于与所用辐射的光谱范围和分光辐射能的分布有关, 因而更能反映滤光器在具体应用场合的透射情况.

2 有效透射比的计算方法

在太阳辐射研究中, 我们曾采用“三片法”对滤光器进行了直接测定^[1-3], 但对于本滤光器来说, 则无法实测. 因为: ①无法制作出 3 片完全一致的滤光器; ②红外辐射源与日射源的最大不同就在于其无处和无时不在, 易产生干扰; ③红外光谱辐射的能量极弱, 难于测准. 所以, 唯一方法就是通过透射比的计算, 评估滤光器的性能.

在有效透射比的计算中, 大气辐射的分光辐亮度值可利用 LOWTRAN 7 软件得出. 由于向下的大气辐射光谱辐亮度的角度分布存在着一定的各向异性, 所以在对天顶角进行积分的过程中, 采用了数值计算.

滤光罩的光谱透过比是借助北京卫星制造厂理化实验室从美国 BIO-RAD 公司进口的 FTS-175 型傅利叶红外光谱仪测量的. 该红外光谱仪采用特殊全密封防潮设计, 抗震隔热, 使用中无需调整, 其光谱范围分为: 近红外段 $7000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ ($1.42 \sim 25 \mu\text{m}$) 和远红外段 $500 \sim 130 \text{ cm}^{-1}$ ($20 \sim 76 \mu\text{m}$). 光学分辨率优于 0.5 cm^{-1} . 每个测量值实际是 100 个光谱的平均值, 每个完整的光谱共含 1340 个波段的透射比值(参见图 1).

半球向大气辐亮度值, 采用低分辨率的 LOWTRAN 7^[4] 计算, 其最小间隔为 5 cm^{-1} . 在需要的波段内, 共计含有 675 个计算点. 为了使之与实测光谱透射比相互匹配, 对 1340 个光谱透射比进行了相应的平均.

计算中, 我们选取了 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 80° 和 90° 天顶角, 主要为了便于与文献^[5]相比较.

3 计算结果及与 Eppley PIR 的比较

表 1~4 给出运用上述方法计算透射比的结果. 从表 1 可知, 在平均透射比的计算中, 波长范围的选取是有讲究的. 由于每个滤光罩的起始和终止波长不同, 如硬性规定波段范围, 势必导致平均透射比的变化. 表 1 中 $130 \text{ cm}^{-1} \sim a$ (透射比为 1% 处的波数) 的波段范围限定起始波长, $400 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ 限定终止波长, $130 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ 则未加任何限制, 它们

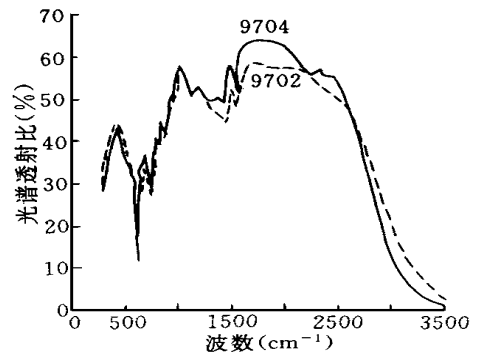


图 1 两个国产硅罩(No. 9702 和 No. 9704)的实测光谱透射曲线

的结果不相同. 就滤光罩来说, 限定起始波长是必要的, 否则起始计算的波长距开始透过的波长越远, 给有效透射比的计算带来的影响也将越大. 不管按照哪一种的计算结果, 国产罩透射比的最大差异均在 17% 左右. 由此可知, 滤光罩间是没有互换性的, 也就是说, 一台仪器如换了滤光罩, 则必须对其重新检定.

表 2 中所列数据是国产罩在不同的模式大气下的有效透射比. 与表 1 比较可见, 它们之间有对应关系. 有效透射比较平均透射比偏大 4% ~ 5%. 不同模式大气下有效透射比的差异大于滤光罩间的差异. 另外, 每个滤光罩在不同大气下的有效透射比与该大气中的水汽含量及半球向辐照度之间存在着良好的相关(表 3). 根据文献[5]对 8 个 Eppley 罩的分析, 8 个罩中同样没有互换性; 罩之间透射比的差异可达 20% 以上. 另外, 他们根据透射情况, 将 8 个 Eppley 罩分成了两个组: 即 No. 1 ~ No. 4 和 No. 5 ~ No. 8.

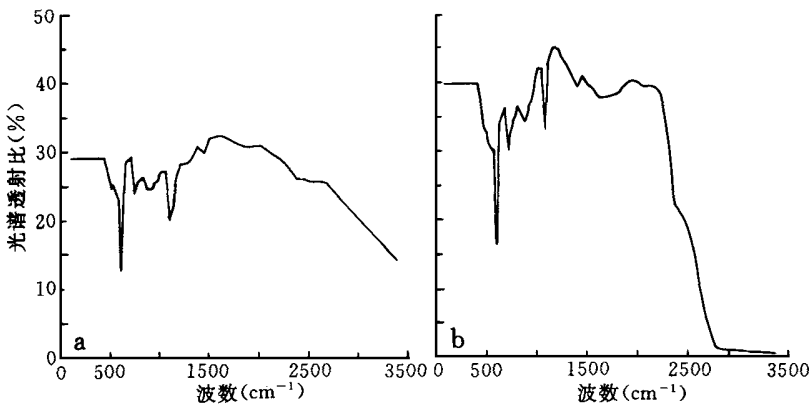


图 2 Eppley 硅罩 No. 8(a) 和 No. 4(b) 的实测光谱透射比^[5]

表 1 国产滤光罩不同波长范围内的平均透射比

表号	130 cm ⁻¹ ~ a		400 ~ 3500 cm ⁻¹		130 ~ 3500 cm ⁻¹	
	平均透射比	波段数	平均透射比	波段数	平均透射比	波段数
9701	37.36	1323	38.08	1237	36.89	1340
9702	39.70	1339	40.79	1243	39.68	1340
9703	39.51	1340	40.40	1243	39.51	1340
9704	41.48	1340	42.61	1243	41.48	1340
9705	37.11	1340	38.09	1243	37.11	1340
9706	42.06	1333	42.84	1243	41.85	1340
9707	35.53	1307	36.16	1220	34.67	1340
9708	39.25	1319	40.10	1233	38.65	1340
9709	34.99	1340	34.88	1243	34.99	1340
9710	41.94	1339	43.30	1243	41.91	1340

注: a 为透射比为 1% 处的波数.

图 2 给出 Eppley 罩 No. 8 和 No. 4 的实测光谱透射比. No. 4 曲线大约在 2800 cm⁻¹ 处开始抬升(此外 $\tau \neq 0$), 2400 cm⁻¹ 处达到 20%, 透射的总体水平大体维持在 40%; 而 No. 8 曲线在 3500 cm⁻¹ 处透射比已近 14%, 然后缓慢抬升, 至 2800 cm⁻¹ 处才达到 20%,

透射的总体水平大体维持在 30%。由此可见, No. 5~ No. 8 这一组罩显然不符合截止区在 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 和越陡越好的要求。而国产罩则比较符合(图 1 和表 4), 总体透射水平也较高。

表 2 国产罩的有效透射比及模式大气的水汽含量 $u(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 和辐照度 $F(\text{W}\cdot\text{cm}^{-2})$

表号或项目	热带	中纬度夏季	中纬度冬季	亚极地夏季	亚极地冬季	'76 美国标准	标准偏差
9701	44.462	44.317	43.612	44.089	43.139	44.054	0.4897
9702	44.020	43.784	42.793	43.440	42.210	43.391	0.6665
9703	45.618	45.463	44.757	45.222	44.321	45.202	0.4795
9704	43.414	43.095	41.742	42.623	40.959	42.570	0.9064
9705	43.653	43.474	42.624	43.189	42.086	43.161	0.5803
9706	45.924	45.634	44.372	45.299	43.618	45.148	0.8508
9707	41.626	41.502	40.917	41.306	40.541	41.299	0.4020
9708	43.749	43.534	42.630	43.218	42.100	43.194	0.6080
9709	38.559	38.343	37.436	38.023	36.914	38.010	0.6071
9710	46.955	46.716	45.664	46.354	45.031	46.319	0.7105
F	329.1	304.0	214.3	269.5	174.4	266.3	—
F^*	396.5	351.6	223.2	301.9	172.3	287.7	—
F^{**}	273.7	250.2	167.9	218.4	132.1	215.0	—
u	4.170	2.960	0.860	2.100	0.420	1.430	—

注: * 为文献[5]中的计算值, ** 为 $< 25\ \mu\text{m}$ 的计算值。

表 3 国产罩有效透射比与模式大气中的水汽含量和半球向辐照度之间的相关系数(R_u, R_F)

表号	有效透射比与水汽含量的相关			有效透射比与半球向辐照度的相关		
	a	b	R_u	a	b	R_F
9701	43.317	0.316	0.903	41.736	0.0085	0.9925
9702	42.399	0.439	0.921	40.249	0.0116	0.9966
9703	44.476	0.312	0.910	42.926	0.0084	0.9948
9704	41.213	0.597	0.920	38.288	0.0158	0.9968
9705	42.282	0.376	0.907	40.408	0.0101	0.9933
9706	43.872	0.558	0.916	41.125	0.0148	0.9955
9707	40.682	0.259	0.902	39.383	0.0070	0.9921
9708	42.276	0.399	0.918	40.314	0.0106	0.9964
9709	37.088	0.399	0.917	35.127	0.0106	0.9962
9710	45.248	0.465	0.914	42.954	0.0124	0.9952

注: a, b 为线性回归方程系数。

表 4 国产罩在 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 范围内不同透射比所在的波长(单位: μm)

透射比 $\tau(\lambda)$	9701	9702	9703	9704	9705	9706	9707	9708	9709	9710
1%	3.09	2.65	2.60	2.80	2.84	2.95	3.29	3.14	2.84	2.79
10%	3.50	3.13	3.04	3.27	3.30	3.36	3.61	3.56	3.31	3.28
15%	3.61	3.25	3.13	3.36	3.39	3.45	3.45	3.71	3.64	3.38
20%	3.74	3.34	3.20	3.45	3.46	3.52	3.79	3.71	3.49	3.45

为了便于比较, 现将文献[5]的结果集中地列于表 5, 将其与表 1 对照, 不难看出国产

罩的平均透射比均高于 Eppley 罩近 10%。

表 5 Eppley 滤光罩的有关技术性能参数^[5]

表号(No)	有效透射比	标准偏差	平均透射比	R_u	R_F
1	33.36	0.1256	29.82	0.6860	0.9013
2	34.90	0.0968	35.16	0.6303	0.8240
3	30.31	0.0797	26.05	0.4797	0.7506
4	36.32	0.0596	27.85	0.3885	0.4807
5	34.60	0.0693	35.65	- 0.7489	- 0.6326
6	35.93	0.1038	35.11	- 0.7870	- 0.5862
7	34.81	0.1734	34.43	- 0.8253	- 0.5539
8	27.21	0.1472	26.29	- 0.9020	- 0.7102

国产罩的有效透射比显然要比 Eppley 的高(见表 3)。但需要指出的是:①文献[5]所用滤光罩光谱透射比的实际测量范围仅限于 $3333 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ ($3 \sim 25 \mu\text{m}$), 而计算辐亮度的波长范围则是 $3390 \sim 110 \text{ cm}^{-1}$ ($2.95 \sim 90 \mu\text{m}$), 这种波段范围上的不匹配是如何处理的, 文献[5]未加说明。为了进行比较, 我们先按照 $3333 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的数据计算了半球向辐照度, 这就是表 2 中的 F^{**} 与 F^* 的数据相对照, 不难看出, 结果相差甚远。因此, 我们放弃了按 $3333 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 范围进行计算的打算;②利用 LOWTRAN 7 计算的辐照度值大多比文献[5]的低, 但也不尽然, 例如亚极地冬季模式大气下的数值反而比 Eppley 滤光罩的高, 且它们的差值似乎与模式大气中的水汽含量有关, 水汽含量越高, 差值也越大;反之亦然, 甚至为负值。形成这些差异的原因, 看来只能从辐射计算软件本身对大气中各种成分的吸收、辐射和散射的方式不同去寻找;③计算结果还表明, 模式大气对有效透射比的影响大于文献[5]所给出的。这从每个罩的标准偏差项也可看出(表 2)。对于文献[5]所给出的标准偏差过小, 我们是有疑问的, 因为即使是透过曲线相当平整的锐截止型有色光学玻璃滤光片, 在不同的模式大气下, 其差异也不会如此小;④在探讨每个罩的有效透射比与半球向辐照度和水汽含量的相关性方面, 文献[5]得到的相关系数之所以那么差, 甚至出现反号现象, 我们认为, 也与不同模式大气下的有效透射比差异小, 拉不开档次有关。

4 结 论

(1) 国产长波辐射滤光罩的透射情况, 无论是有效透射比还是平均透射比均不差于 Eppley 滤光罩, 具体指标甚至有所超过;

(2) 无论是国产的还是 Eppley 的滤光罩, 由于每个罩的干涉膜都是单个制作的, 因此个体差异较大, 罩间无互换性;

(3) 今后再生产滤光罩时可提出具体的技术性能指标, 以减少生产中的盲目性和提高滤光罩的质量;

(4) 如欲减少有效透射比受大气中水汽含量的影响, 可因地或因时制宜地使用相应的有效透射比来减少其影响, 当然, 这也仅能部分减少, 因为频繁地改变仪器的有效透射比较难, 何况大气中的水汽含量又变化多端.

参考文献

- 1 王炳忠. 关于滤光片透射系数的直接测定. 太阳能学报, 1988, 9: 338~ 344.
- 2 王炳忠. 关于滤光片透射系数直接测定的误差. 太阳能学报, 1992, 13: 416~ 421.
- 3 王炳忠. 刘庚山. 滤光片滤光因子的光谱计算研究. 太阳能学报, 1993, 14: 116~ 122.
- 4 Kneizys F X, Shettle E P, Abreu, L W, et al. Users Guide to LOWTRAN 7. AFGL-TR-88-0177, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA. 1998.
- 5 Miskolczi F and Guzzi R. Effect of non-uniform spectral dome transmittance on the accuracy of infrared radiation measurements using shielded pyrrometers and pyrgeometers. *Appl. Opt.*, 1993, 32: 3257~ 3265.

THE PERFORMANCE MEASUREMENT OF CHINA-MADE SILICON DOMES OF PYRGEOMETER

Wang Bingzhong

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The dome is a key component of pyrgeometer, the performance of which would influence the quality of pyrgeometer. By using the data Lowtran 7 and the data of transmittance for some kinds of China-made domes, the performance indexes of effective transmittance for some kinds of domes are calculated in different model atmospheres. The results show that the performance indexes of China-made dome are not lower than those of Eppley.

Key words: Pyrgeometer Silicon dome Performance measurement