

# 太阳辐射试验标准中的太阳光谱分布

赵立华, 唐其环

(中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

**摘要:** 目的 为太阳辐射试验标准、光老化试验标准修订时正确选择太阳光谱提供依据。方法 辨析 CIE NO.20, CIE NO.85 两种出版物太阳辐射光谱特点, 从五个方面对此问题进行探讨, 统计这两种太阳辐射光谱带宽辐照度的误差; 分析相对空气质量、臭氧与水分、云层光学厚度、地表反射率等因素对太阳辐射光谱辐照度的影响; 分析人工辐射光源光谱分布特点, 以及它们与太阳辐射光谱的差别; 分析当前光老化试验标准对光谱辐照度允差的要求; 介绍光老化试验结果间的可比性。结果 CIE NO.85 光谱更准确、更细致, 但其波长范围较窄, 两种光谱辐照度的差别很小, 大气环境中许多因素会降低到达地面的光谱辐照度; 人工辐射光源光谱与太阳光谱的误差、光老化试验标准中光谱辐照度允差都远大于前述太阳辐射光谱间的误差, 标准对太阳光谱波长范围的要求比 CIE NO.85 光谱宽。结论 太阳辐射试验标准、光老化试验标准修订时, 仍可选用 CIE NO.20 光谱作为太阳辐射光谱。

**关键词:** CIE NO.20; CIE NO.85; 太阳辐射试验; 太阳辐射光谱

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.11.013

**中图分类号:** TJ01      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)11-0065-06

## Solar Spectral Distribution in Solar Radiation Test Standard

ZHAO Li-hua, TANG Qi-huan

(No.59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT: Objective** To provide basis for correct selection of the solar spectrum in amendment of radiation test standard for the sun and light aging test standard. **Methods** By analyzing CIE NO.20, CIE NO.85 between two publications of solar radiation spectrum characteristics, this paper probed into this issue from the following five aspects: error statistics of these two kinds of solar irradiance spectral bandwidth; analysis of the relative quality of air, ozone and water, cloud optical thickness, surface reflectance and other factors on the impact of solar spectral irradiance; characteristic analysis of spectral distribution of the light source and the difference between them and the artificial radiation, the solar radiation spectrum; analysis of current requirements of light aging test standard of spectral irradiance tolerance; introduction to result comparability of two light aging tests. **Results** CIE NO.85 spectrum was more accurate and more detailed, but its wavelength range was narrow; the difference between two spectral irradiance was very small. The spectral irradiance could be prevented from reaching the ground by many factors in the atmospheric environment. The error of light aging test standard of spectral irradiance tolerance and the solar spectrum was far greater than two the solar radiation spectrum of the error between the publications. The wavelength coverage of solar spectrum required by the standard was wider than that of CIE NO.85. **Conclusion** CIE NO.20 spectrum might be selected as the solar radiation spectrum in amendment of radiation test standard for the sun and light aging test standard.

**KEY WORDS:** CIE NO.20; CIE NO.85; solar radiation test; solar spectra

太阳辐射光谱分布的作用在于指导人工光源的发明、试验装置的开发、试验标准的制定和试验结果的评判,太阳辐射试验标准总是要列出典型气候条件下的太阳辐射光谱分布。GJB/T 150.7A—2009<sup>[1]</sup>与 GB/T 2424.14—1995<sup>[2]</sup>采用了国际照明委员会第 20 号出版物 CIE NO.20 的太阳辐射光谱分布; GB/T 1865—2009<sup>[3]</sup>, GB/T 14522—2008<sup>[4]</sup>, GB/T 16422.1—1999<sup>[5]</sup>则采用了 CIE NO.85 出版物<sup>[6]</sup>中的太阳辐射光谱。这两份出版物是将人造光源与自然光进行对比的国际标准, CIE NO.20 已于 1989 年被 CIE NO.85 替代,孙杏蕾、张恒撰文主张相关标准应采用 CIE NO.85 的光谱<sup>[7]</sup>。GB/T 2423.24—2013<sup>[8]</sup>修订时取代了 1995 版的 GB/T 2424.14 和 GB/T 2423.24<sup>[9]</sup>, 该标准也采用了 CIE NO.85 的光谱, CIE NO.20 太阳辐射光谱被替代似乎已成定局。CIE NO.20 中的光谱是否还有存在价值,在相关标准修订时是否注定要被取代。鉴于此,文中分析比较了两种光谱的分布,并从光老化试验标准对光谱的要求和当前老化试验水平两方面对该问题进行了初步讨论。

## 1 不同光谱分布的比较

### 1.1 CIE NO.20 光谱分布

文中分析的 CIE NO.20 光谱来源于 GB/T 2424.14—1995 标准附录 A。在该标准中,太阳辐射光谱波长范围设定为 280 ~ 3000 nm,共划分了 19 个带宽,紫外线和可见光区域间隔为 40 nm,红外线区域间隔大多为 200 nm,总的辐照度为 1120 W/m<sup>2</sup>。GJB/T 150.7A—2009 明确表示该光谱代表了海拔 4 ~ 5 km 环境的光谱,且强调在海平面和高海拔地区都使用此光谱; GB/T 2424.14—1995 则笼统说是地球表面环境。图 1 为摘自 GB/T 2424.14—1995 的 CIE NO.20 太阳光谱。

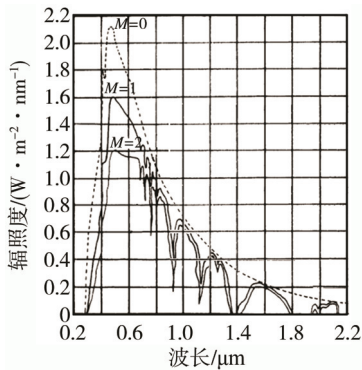


图 1 相对空气质量为 1 时 CIE NO.20 太阳光谱辐照度

由图 1 可知,大气上层太阳辐射为连续光谱,在海拔 4 ~ 5 km 处则为吸收光谱。当太阳在头顶时 (M=1) 的最大辐照度约为 1.6 W/(m<sup>2</sup>·nm),对应波长

在 0.4 ~ 0.5 μm 之间。

### 1.2 CIE NO.85 光谱分布

CIE NO.85 提供了海平面的日光光谱辐照度,其大气衰减参数:相对空气质量为 1,水蒸气含量为 1.42 cm 沉积水,臭氧含量为 0.34 cmSTP,地表反射率为 0.2,空气溶胶消光厚度(在 λ=500 nm 处)为 0.1 或 0.27。GB/T 1865—2009 完整地引用了 CIE NO.85 空气溶胶消光厚度为 0.1 时的太阳光谱分布,其他相关标准则给出了不同带宽的统计辐照度。

CIE NO.85 提供的海平面光谱波长范围为 305 ~ 2450 nm,104 个波长太阳光的辐照度值,紫外线区域波长间隔为 5 ~ 10 nm,可见光区域和红外线区域波长间隔为 10 ~ 20 nm,红外线区域最大波长间隔达到 90 nm,总辐照度因空气溶胶消光厚度不同而不同。当相对空气质量为 1,空气溶胶消光厚度(在 λ=500 nm 处)为 0.1,0.27 时,总辐照度分别为 1090.40 W/m<sup>2</sup> 和 1074.91 W/m<sup>2</sup>,光谱分布如图 2 所示。图 2 与 GB/T 2423.24—2013 的 CIE NO.85 太阳光谱一致。

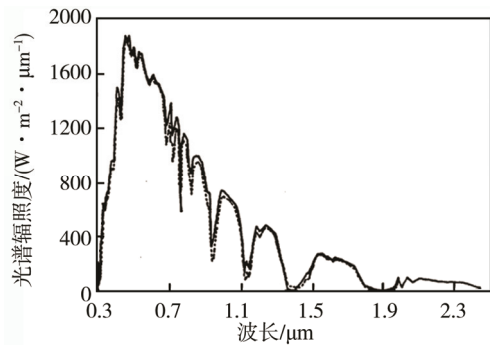


图 2 相对空气质量为 1 时不同气溶胶消光深度 CIE NO.85 太阳光谱辐照度

图 2 中实线、虚线分别表示气溶胶消光厚度为 0.1 和 0.27。由图 2 可知,在其他条件相同的情况下,两种气溶胶消光厚度对应的太阳辐射相差较小,且当太阳在头顶时 (M=1) 的最大辐照度约为 1.9 W/(m<sup>2</sup>·nm),对应波长也在 0.4 ~ 0.5 μm 之间。

比较图 1 和图 2 可知,两出版物的光谱分布形态完全一致,但 CIE NO.20 的总辐照度高于 CIE NO.85,且其最大辐照度却低于 CIE NO.85。此外,文献[6]认为,在 CIE NO.20 发布后的十几年,监测技术的发展和相关模型、方法的改进获得了大量的最新太阳辐射光谱数据,使得 CIE NO.85 所考虑的大气衰减参数更多、带宽可划分得更细。

### 1.3 不同光谱分布辐照度大小比较

#### 1.3.1 相同带宽辐照度

为了比较不同光谱分布辐照度的大小,根据 CIE NO.20 和 CIE NO.85 两出版物的光谱分布数据统计相

同带宽的辐照度，统计结果见表 1。

表 1 不同出版物日光光谱辐照度

带宽/nm	CIE NO.20 光谱/(W·m <sup>-2</sup> )	CIE NO.85光谱/(W·m <sup>-2</sup> )	
		消光深度0.27	消光深度0.1
≤320	5	3.71	4.06
320~360	27	26.20	28.45
360~400	36	39.63	42.05
400~440	56	56.52	59.33
440~480	73	73.20	74.80
480~520	71	69.33	70.19
520~780	360	378.44	379.65
780~1200	284	271.12	274.11
1200~1800	138	122.26	123.10
≤1800	1050	1040.41	1055.74
≤2450	≈1105	1074.91	1090.40

从表 1 可知，CIE NO.20 光谱与消光深度为 0.27 的 CIE NO.85 光谱相比，360 nm 以下的紫外光谱、480~520 nm 的可见光谱、780 nm 以上的红外光谱的辐照度是 CIE NO.20 光谱高于 CIE NO.85 光谱，其余波长范围的光谱辐照度则是 CIE NO.20 光谱低于 CIE NO.85 光谱。与消光深度为 0.1 的 CIE NO.85 光谱相比，两出版物光谱的辐照度大小关系与此略有不同。就紫外光谱辐照度大小比较看，GJB150.7A—2009 中“高海拔地区的太阳辐射光谱中所含的有害紫外辐射的比例更大”的说法是不准确的。

### 1.3.2 光谱带宽辐照度比较

根据表 1 中的数据，计算 CIE NO.20 光谱相对于消光深度为 0.1 的 CIE NO.85 光谱各带宽辐照度的相对误差，计算结果见表 2。表中负号表示 CIE NO.20 光谱辐照度小于 CIE NO.85 光谱辐照度。

表 2 CIE 两出版物光谱辐照度相对误差

带宽/nm	相对 误差/%	带宽/nm	相对 误差/%	带宽/nm	相对 误差/%
≤320	22	400~440	-6	520~780	-5
320~360	-5	440~480	-2	780~1200	4
360~400	-14	480~520	1	1200~1800	12

从表 2 可知，两种光谱辐照度在紫外区域相差较大，波长在 1200 nm 以上的红外区域相差次之，波长在 480~1200 nm 区域则较接近。

根据表 1 中的数据，计算 CIE NO.85 光谱在气溶胶消光深度 0.27 光谱相对于消光深度 0.1 光谱各带宽

辐照度的相对误差，计算结果见表 3。表中负号表示 CIE NO.85 光谱在气溶胶消光深度 0.27 的环境中辐照度小于消光深度 0.1 环境的辐照度。

表 3 气溶胶消光深度 0.27 相对于 0.1 的辐照度相对误差

带宽/nm	相对 误差/%	带宽/nm	相对 误差/%	带宽/nm	相对 误差/%
≤320	-9	400-440	-5	520-780	0
320-360	-8	440-480	-2	780-1200	-1
360-400	-6	480-520	-1	1200-1800	-1

从表 3 可知，在相对空气质量、水蒸气含量、臭氧含量、地表反射率都相同的情况下，波长越短，辐照度的相对误差越大，在紫外区域相对误差接近 10%。

## 1.4 影响太阳辐射光谱辐照度的因素

### 1.4.1 相对空气质量的影响

相对空气质量是指太阳光线穿过地球大气层的路程与太阳在天顶位置时光线穿过地球大气层的路程之比值，也称为大气质量。规定在海平面上，当太阳处于天顶位置时，太阳光线垂直照射时相对空气质量为 1。相对空气质量是太阳高度角的函数，与赤纬角、太阳时角、当地纬度有关<sup>[10]</sup>，只有南北回归线内的地区在夏季正午时相对空气质量才可能为 1。图 3 为 CIE NO.85 给出的相对空气质量对光谱辐照度的影响，其他大气衰减参数：气溶胶 500 nm 光学厚度为 0.2，臭氧含量为 0.3 cm，水蒸气含量为 2 cm 沉积水，地表反射率为 0.2，模型为 LOWTRAN Rural (RH 为 0%) 模型。

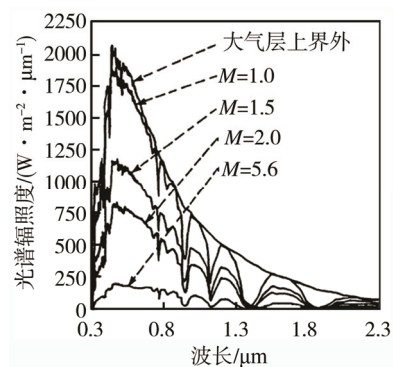


图 3 不同相对空气质量的太阳光谱辐照度

由图 3 可知，相对空气质量越大，太阳的辐射强度越小，可见光区域为吸收光谱。

### 1.4.2 氧与水蒸气的影响

臭氧与水蒸气对太阳光谱辐照度的影响见图 4，其他大气衰减参数：相对空气质量为 1，无吸收剂，地面反射率为 0.2。

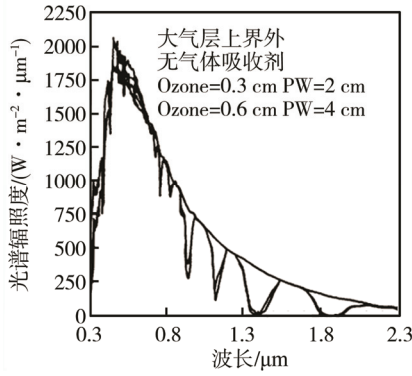


图4 臭氧与水蒸气对太阳光谱辐照度的影响

大气层上界外, 没有光谱吸收剂, 太阳光谱属于连续光谱。阳光进入大气层后, 大气层中的水蒸气、氧、臭氧会吸收特定波长的太阳光, 使得到达地面的太阳辐射光谱分布曲线不再光滑连续而成为吸收光谱。由图4可知, 臭氧和水蒸气含量越高, 其吸收作用越强。

氧、臭氧、水蒸气对辐射的吸收作用具有波长选择性, 吸收情况如图5所示。

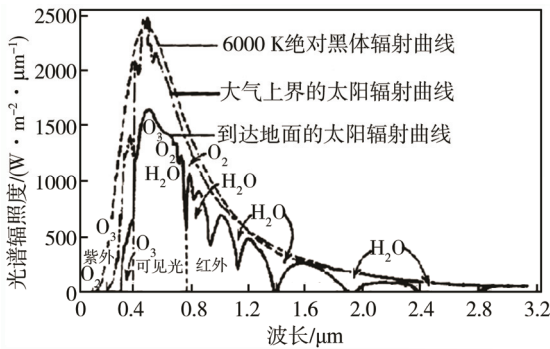


图5 氧与水蒸气对特定波长的吸收情况

由图5可知, 氧和臭氧主要吸收紫外和可见光区域的辐射, 水蒸气主要吸收红外区域的辐射, 而且水蒸气对特定波长吸收的选择性更强。

### 2.4.3 云层光学厚度的影响

云层光学厚度对太阳辐射光谱的影响如图6所示

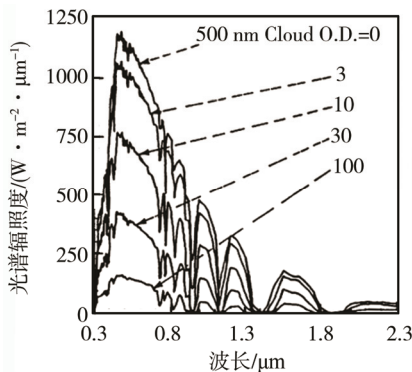


图6 云层光学厚度对太阳总辐射的影响

示, 其他大气衰减参数: 相对空气质量为 1.5, 臭氧含量为 0.3 cm, 水蒸气含量为 2 cm 沉积水, 地表反射率 0.2, 模型为 LOWTRAN Rural (RH 为 0~60%) 模型。

由图6可知, 云层光学厚度对太阳辐射的影响很大, 云层厚度越厚, 到达地面的光谱辐照度越低。

### 1.4.4 地表反射率的影响

地表反射率是指地表物体向各个方向上反射的太阳总辐射通量与到达该物体表面上的总辐射通量之比。当太阳处于天顶位置时, 太阳辐射是垂直向下的, 虽然地表反射的阳光没有垂直向下的分量, 但向上的反射光通过云层的再次反射, 或空气中微粒的散射而出现向下的辐射分量, 从而影响辐射强度。表4列出了不同下垫面和地表的反射率<sup>[11]</sup>。

表4 典型地表面的地表反射率

地表状态	反射率	地表状态	反射率	地表状态	反射率
沙漠	0.24~0.28	干湿土	0.14	湿草地	0.14~0.26
干燥裸地	0.1~0.2	湿黑土	0.08	新雪	0.81
湿裸地	0.08~0.09	干草地	0.15~0.25	冰面	0.69

由表4可知, 不同下垫面的反射率相差很大, 对照干燥裸地、干草地、湿草地的地表反射率可以达到0.2。这也是 CIE NO.85 出版物光谱的地表反射率。

上述大气衰减参数对太阳光谱辐照度的影响有较大的。虽然 CIE NO.20 光谱不对其进行明确描述, 或许“夏季晴朗天气太阳垂直照射”的条件已保证了它与 CIE NO.85 光谱大气衰减参数基本一致, 这才使得两种太阳光谱的分布基本一致。

综上, CIE NO.20 光谱与 CIE NO.85 光谱存在以下特点: 在相同波长范围内光谱辐照度的偏差大多在 20% 以下; 由于新模型的应用, CIE NO.85 光谱分布的划分更细致; CIE NO.85 光谱考虑了更多的大气衰减参数的影响, 而 CIE NO.20 光谱, 只强调了相对空气质量为 1; CIE NO.85 光谱范围较窄, 没有 300 nm 以下的紫外光和 2450~3000 nm 的红外光。

## 2 试验用人工辐射光源与阳光光谱分布的差异

实验室老化试验常用光源有荧光紫外灯、碳弧灯、氙弧灯等, 各光源的主要特点如下所述。

1) 荧光紫外灯。荧光紫外灯包括 UVB-313, UVA-340, UVA-351 三种光源, 各光源的特点为: UVB-313 光源的光谱包括了 280~400 nm 的紫外线, 而到达地球表面的紫外线中波长不会低于 295 nm,

即 UVB-313 光源包含了太阳光谱中没有的短波长紫外线,而这部分紫外线的能量很强,很容易使高分子材料发生老化,导致老化结果失真,常用于快速筛选材料和研究材料的耐紫外线性能;UVA-340 光源在 295~365 nm 的紫外波段最接近于太阳光的紫外线光谱,它的辐射峰值是在 340 nm,是目前最接近于户外阳光的紫外光源;UVA-351 光源模拟日光被窗户玻璃过滤后的紫外线部分,它适用于户内环境应用。

2) 碳弧灯。碳弧灯有封闭式碳弧灯和阳光型碳弧灯。封闭式碳弧灯碳棒通过电流发出弧光,其光谱能量分布与阳光光谱能量分布相差较大,没有阳光中的短波紫外辐射,在 400~800 nm 之间也没有日光的高强度能量;阳光型碳弧灯与日光的光谱能量分布的匹配性虽有所改善,但二者在 50~350 nm 之间的光谱能量分布有很大差异。

3) 氙弧灯。氙弧灯光谱区为 0.28~3.0  $\mu\text{m}$ ,图 7 为 GB/T 2424.14—1995 列出的氙弧灯光谱曲线。

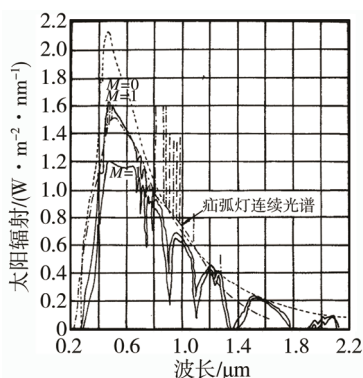


图 7 典型氙弧灯辐射与太阳辐射比较

由图 7 可知,氙弧灯光谱与相对空气质量为 1 时到达地面的太阳辐射光谱很相似,但二者的差别仍然很明显。在红外线区域,到达地面的太阳辐射光谱属于吸收光谱,而氙弧灯光谱为连续光谱;在 0.8~1.0  $\mu\text{m}$  范围,氙弧灯光谱有一丛高能量峰线;在紫外和可见光区域,氙弧灯光谱与日光谱也存在明显的差别。

氙弧灯的光谱分布在当前最接近太阳光,使用滤光片调节光谱能量分布能够比其他人工光源更好地模拟各种条件下的自然日光。即便如此,二者之间的差别也远远大于 CIE NO.20 光谱与 CIE NO.85 光谱之间的差别。

### 3 光老化试验标准对光谱的要求

#### 3.1 光谱范围

GB/T 1865—2009 认为低于 300 nm 的辐射不能到达地球表面,高于 3000 nm 波长的辐射可以忽略不计,即低于 3000 nm 波长的辐射是不能忽略的。这说

明 CIE NO.85 光谱不能满足该标准对辐射波长上限的要求。对于下限,该标准是认同氙灯光谱波长可以小于 290 nm 的,这说明 CIE NO.85 光谱也不能满足该标准对辐射波长下限的要求。

GJB 150.7A—2009 明确要求光谱能量分布的波长为 280~3000 nm,显然 CIE NO.85 光谱不能满足该标准对辐射波长上、下限的要求。GJB 150.7A—2009 认为到达地球表面波长小于 300 nm 的辐射量是很小的,但对材料的劣化效应可能很显著。此表述与 GB/T 1865—2009 不同,这会影响到对光谱中含有少量波长小于 300 nm 的辐射试验的认知。按照 GJB 150.7A—2009,试验仍属于模拟试验,而按照 GB/T 1865—2009 则属于加速试验。太阳辐射试验标准对光谱范围的要求宽于 CIE NO.85 光谱范围,因此 CIE NO.85 光谱是不能取代 CIE NO.20 光谱的。

#### 3.2 光谱辐照度允差

GJB 150.7A—2009 规定了 0.28~3.00  $\mu\text{m}$  波长范围的辐照度是  $(1120 \pm 112) \text{ W/m}^2$ ,以及紫外光、可见光和红外线光谱能量分布和允差,见表 5。

表 5 太阳辐射试验光谱能量分布和允差

特性	光谱范围			
	紫外线	可见光	红外线	
波长范围/ $\mu\text{m}$	0.28~0.32	0.32~0.40	0.40~0.78	0.78~3.00
辐照度/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	5	63	560	492
辐照度 允差/%	$\pm 35$	$\pm 25$	$\pm 10$	$\pm 20$

比较表 2 与表 5 中的数据可知,两种光谱辐照度之差远小于 GJB 150.7A 要求的辐照度允差。

GB/T 16422.2—2014<sup>[12]</sup>根据不同批号及不同使用时间后装有日光滤光器的光谱,得到了紫外区域不同带宽的辐照度占总紫外辐照度的百分比,结果见表 6。为便于比较,笔者列出了根据 CIE NO.20 光谱计算的相应百分比。

表 6 配置日光滤光器的氙弧灯的相对光谱辐照度

波长/ $\mu\text{m}$	最小值/%	CIE NO.85 光谱/%	CIE NO.20光 谱/%	最大值/%
$\leq 290$	—	—	—	0.15
290~320	2.6	5.4	7.4	7.9
320~360	28.2	38.2	39.7	39.8
360~400	54.2	56.4	52.9	67.5

由表 6 可知,CIE NO.20 光谱紫外的分布基本上在最大值和最小值之间,即 CIE NO.20 光谱能满足 GB/T 16422.2—2014 的光谱允差要求。

### 4.3 标准对光谱辐照度控制的要求

CIE NO.85 光谱是在相对空气质量、气溶胶光谱深度、地面反射率等条件下推算的,就相对空气质量来说,只有回归线内地区夏天中午的值才可能为 1,即 CIE NO.85 光谱的光强比实际环境高很多。因此,虽然 CIE NO.85 光谱在 340, 420 nm 处的光强分别为 0.68, 1.5 W/(m<sup>2</sup>·nm),为提高实验结果与实际条件的相关性,还有很多标准常采用较小的辐照度。如 GB/T 1865—2009 采用 0.51 W/m<sup>2</sup>@340 nm 的辐照度,甚至更低的 0.48 W/m<sup>2</sup>@340 nm<sup>[13]</sup>,该值已偏离 CIE NO.85 光谱 30%。

标准对光谱的允差要求较宽,且在试验过程中对辐照度的控制往往又偏离光谱的允差范围,这都远大于 CIE NO.20 光谱与 CIE NO.85 光谱之间的偏离值。就波长范围来说,只有 CIE NO.20 光谱才满足标准对 280~3000 nm 波长范围的要求,CIE NO.85 光谱是不满足的。

## 5 光老化试验结果间的可比性

影响光老化试验结果的因素很多,灯管、冷却方式、试验模式、试验样品、装置、试验条件等<sup>[13-15]</sup>,但制约老化试验发展的关键因素则是试验辐照度的代表性、人工光源的光谱能量分布与稳定性、试验设备的先进性。各种因素的综合作用导致了不同光源、不同型号设备之间的老化试验结果有明显差别<sup>[16]</sup>,GB/T 16422.2—1999 中规定不同型号的氙灯人工老化箱的试验结果不宜进行相互比较<sup>[17]</sup>,即便同一型号的不同设备,GB/T 16422.2—2014 也认为不宜进行相互比较。

显然,光老化试验结果的可比性差,并不是遵循不同的太阳光谱分布造成的。相对于上述所列影响因素,CIE NO.20 光谱与 CIE NO.85 光谱之间的差异对光老化试验结果的影响可忽略不计。

## 6 结语

当前太阳辐射试验结果的可比性和模拟性都较差,其原因为:人工光源与太阳光的匹配性较差,不能很好地再现太阳辐射光谱的分布;试验设备条件控制能力不能完全控制光源的不利因素;实际环境所受

太阳辐射光谱的分布与典型条件下太阳光谱的分布存在较大差异。CIE NO.20 光谱与 CIE NO.85 光谱之间的差别很小,其差别不足以引起试验结果的较大误差;CIE NO.85 光谱波长范围较窄,不能完全满足当前太阳辐射试验标准对光谱波长范围的要求。因此,在 GJB 150.7A 修订时,仍可选用 CIE NO.20 光谱。

### 参考文献:

- [1] GJB/T 150.7A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第 7 部分: 太阳辐射试验[S].
- [2] GB/T 2424.14—1995, 电工电子产品环境试验第 2 部分: 试验方法太阳辐射试验导则[S].
- [3] GB/T 1865—2009, 色漆和清漆人工气候老化和人工辐射曝露滤过的氙弧辐射[S].
- [4] GB/T 14522—2008, 机械工业产品用塑料、涂料、橡胶材料人工气候老化试验方法荧光紫外灯[S].
- [5] GB/T 16422.1—1999, 塑料实验室光源暴露试验方法第 1 部分: 总则[S].
- [6] Commission Internationale de l'Eclairage. CIE Publication NO.85 Solar Spectral Irradiance[R]. Paris: 52 Bd Malesherbes, F-75008, 1989.
- [7] 孙杏蕾, 张恒. IEC 68-2-5:1975 标准的解读[J]. 电子测试, 2008(10): 47-50.
- [8] GB/T 2423.24—2013, 环境试验第 2 部分: 试验方法试验 Sa: 模拟地面上的太阳辐射及其试验导则[S].
- [9] GB/T 2424.14—1995, 电工电子产品环境试验第 2 部分: 试验方法 试验 Sa: 模拟地面上的太阳辐射[S].
- [10] 张志英, 鲁嘉华. 新能源与节能技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [11] 《大气科学辞典》编委会. 大气科学辞典[K]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [12] GB/T 16422.2—2014, 塑料实验室光源暴露试验方法第 2 部分: 氙弧灯[S].
- [13] 张洪彬, 刘雅智, 蔡汝山, 等. 非金属材料紫外光老化试验方法与标准研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(1): 6-10
- [14] 秦剑. 电子设备太阳辐射试验方法分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(02): 15-21.
- [15] 宋志佗. 模拟太阳辐射试验在通信线缆及附属产品中应用简析[J]. 现代传输, 2014(5): 10-16.
- [16] 陈金爱, 郑玉梅, 余雪辉. 不同型号氙灯人工加速老化试验[J]. 合成材料老化与应用, 2007, 36(3): 4-7.
- [17] GB/T 16422.2—1999 塑料实验室光源暴露试验方法第 2 部分: 氙弧灯[S].