

氙灯试验箱的均匀性研究——

旋转鼓式氙灯试验箱和平板式氙灯试验箱的比较

氙灯测试作为一种加速老化测试方法，在 高分子材料的测试中得到了广泛使用。目前，市场上主要有旋转鼓式和平板式两类老化测试设备。在这两类氙灯试验箱中，所有被测样品的测试条件是否一致？是人们比较关心的问题。本文主要研究两种不同类型的氙灯试验箱——旋转鼓式氙灯试验箱和更先进的平板式氙灯试验箱是如何达到均匀的测试条件的。

■ 美国Q-Lab公司 Gregory Fedor, Patrick Brennan, Gerhard Pausch
翻译：张 恒（美国Q-Lab公司中国代表处）

测试是通过对某些材料的相同样品进行多次、重复的老化测试来获得数据的。试验采用了4种不同的材料：聚苯乙烯、蓝羊毛 L2、蓝羊毛L4以及汽车面漆涂料，这些材料都是在一些标准中规定用于校验氙灯试验箱的标准参考材料。曝晒条件按照SAE J2527、SAE J2412以及AATCC 16等标准规定的测试条件，一共有6家独立实验室参与了这一试验。

测试结果表明，各种不同材料的样品在同一试验箱（旋转鼓式氙灯试验箱或平板式氙灯试验箱）内的测试误差范围为 $\pm 3\%$ ~ $\pm 13\%$ 之间。

1 试验背景

历史上，早期氙灯耐候和耐光试验设备多被设计成在试验箱的中心安放一支氙灯灯管、四周是围绕光源旋转的样品架（参见图1），此类样品安装架经常被称作“旋转鼓”。近些年推出了平板式的氙灯试验箱（参见图2）。

所有氙灯试验箱的一个设计目的都是希望在试验箱内形成一个光

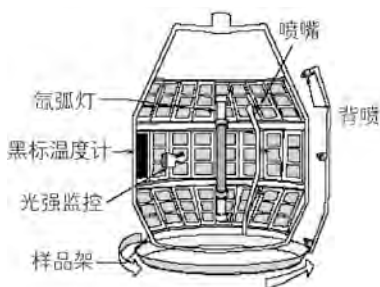


图1 旋转鼓式氙灯试验箱



图2 平板式氙灯试验箱

强、温度以及湿度绝对一致的环境。然而，实际上并不可能获得绝对的均匀性。为了提高均匀性，通常需要在测试过程中轮换样品的曝晒位置。

旋转鼓式氙灯试验箱确实可以自动地在灯管的水平方向轮换样品的曝晒位置，然而，却不能在垂直方向上对光强、温度和湿度的不均匀性进行补偿。平板式氙灯试验箱则需要定期手工轮换样品位置，利

用本文介绍的轮换方法每天只需要1 min的时间。

2 试验目的

先前的研究证明，旋转鼓式氙灯试验箱和平板式氙灯试验箱对不同材料（如塑料、涂料、纺织品、印刷油墨等）的老化模式和等级是基本一致的^[1]。但在同一设备中，不同位置的测试条件的均匀性如何？本文主要通过将不同材料的样品分别放在两类测试箱内进行均匀性测试来研究这个问题。

3 测试方法

老化均匀性测试是将多个相同样品放在同一试验箱内进行测试，并对每个样品的老化程度进行测量。根据测试室大小的不同，重复样品的数量多达9~108个。

下面将分别就材料、试验箱类型、样品安装、曝晒条件、老化评估以及参与研究的实验室进行具体阐述。

3.1 样品材料

采用了3种不同类型的材料：聚

苯乙烯塑料、蓝羊毛（两种规格）和汽车面漆。为了保证研究的代表性和广泛性，试验中选择的材料都是标准的参考材料，同时这几种材料的材质差异较大，涵盖了塑料、纺织和涂料。

(1) 聚苯乙烯

聚苯乙烯是汽车行业标准SAE J1960^[2]和SAE J1885^[3]中规定的用于测试透明塑料光稳定性的标准材料，其老化模式为黄变。该材料对温度和光强的变化敏感。样品尺寸为50 mm×75 mm、厚度为3 mm。样品生产商为Test Fabrics 公司，测试所用样品来自批号6。

(2) 蓝羊毛L2

蓝羊毛L2是AATCC TM16^[4]中要求的日晒色牢度的标准参考材料之一。老化模式为褪色，该材料对温度、相对湿度和光强的变化敏感。样品尺寸为50 mm×100 mm。生产商为AATCC，测试所用样品来自批号8。

(3) 蓝羊毛L4

蓝羊毛L2是AATCC TM16 中要求的日晒色牢度的标准参考材料之一。它比L2的颜色更深且日晒色牢度更好，L4的色牢度为L2的4倍。样品尺寸为50 mm×100 mm。生产商为AATCC，测试所用样品来自批号5。

(4) 汽车面漆

汽车面漆采用由BASF涂料公司生产Alkyd-Melamine。实验室样板制备时，将其涂覆在钢板表面的灰色底涂上。它是VDA 621-430^[5]透明面漆抗龟裂测试方法中推荐使用的参考材料，这种材料类似于汽车面漆，但它会在相对较短的时间内发生龟裂^[6]。该材料对温度、光强和潮湿时间敏感。样品尺寸为50 mm×100 mm×0.8 mm。

3.2 氙灯试验箱类型

(1) 旋转鼓式氙灯试验箱

旋转鼓式氙灯试验箱在第一次世界大战后开始使用。本试验选择美国Atlas公司制造的Ci5000、Ci4000、Ci65A型老化试验箱，原因是这些型号设备在行业内使用较普遍，且Ci5000、Ci4000是最新型。每个型号的试验箱都可以控制光强、黑板温度、箱内空气温度和相对湿度。其中温度和相对湿度的控制是专利设计的^[7-10]。上述设备的样品架是20世纪80年代为提高光强的均匀性而引入的3层样品架。试验中一共采用了5台不同的试验箱：1台Ci5000、一台Ci4000、3台Ci65A。

(2) 平板式氙灯试验箱

本试验采用的试验箱是美国Q-Lab公司生产的Q-Sun Xe-3-HS式氙灯试验箱。该试验箱可控制试验的全部参数——光强、黑板温度、箱内温度和相对湿度。试验箱采用3支氙灯，电源控制系统和光强系统控制都是Q-Lab公司的专利设计^[11,12]。试验箱内的反射墙及光源反射系统能尽可能地均匀辐照光并再现自然漫射光。试验箱的温度控制和相对湿度控制也是专利设计的^[13-15]。试验同样采用5台氙灯试验箱。

3.3 样品安装

(1) 旋转鼓式氙灯试验箱

在旋转鼓式试验箱的垂直方



图3 旋转鼓式样品架中的样品安装

向有上、中、下位置放置3层样品架，每层样品架可放置3个试样，共可放置9个试样。如样品超过9个，则横向依次在转鼓的相应位置安装。聚苯乙烯、汽车面漆为无背板安装，蓝羊毛则根据AATCC TM16的推荐，用白卡纸作为背衬材料安装。

(2) 平板式氙灯试验箱

样品安放在4个小式样品盘中，每个样品盘最多可放置14块50 mm×100 mm的试样，然后将小式样品盘再放置到试验箱中。聚苯乙烯、汽车面漆为无背板安装，蓝羊毛则根据AATCC TM16的推荐，用白卡纸作为背衬材料安装，然后放置于纺织品样品架上。

平板式试验箱推荐样品定期轮换位置。实验中，我们将一套样品定期换位而另一套样品则固定不动，以研究位置轮换对测试均匀性的影响。图4中的1、2、3、4表示某样品在第1天、第2天、第3天、第4天的不同位置。在整个测试过程中，样品安照上述步骤每天进行一次轮换，每天所花费的时间仅为1 min。因蓝羊毛L2d总曝晒时间只有20~24 h，所以要求移动两次位置。

此外，还有另外一些轮换的方法，其中某些方法或许可以得到更好的均匀性。本文中不再介绍，但我们有兴趣继续研究。

3.4 测试标准及测试循环

(1) SAE J2527^[16]

该标准由美国汽车工程师协会

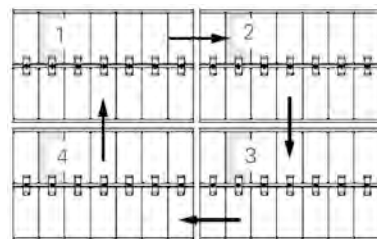


图4 平板样品架中样品位置轮换

(SAE)制订,用于测试汽车外饰件材料,SAE J2527是SAE J1960的替代标准。SAE J2527要求采用配有“紫外延展”过滤器的氙灯,得到的光谱中有比地球表面自然光照中的紫外光波长更短的紫外光,原因是这种短波紫外光可以加速老化的速率。测试循环包括光照周期和暗周期以及潮湿和干燥周期,光强控制点为340 nm。表1为该标准规定的测试循环。

(2) SAE J2412^[17]

该标准用于测试汽车的内饰材料,SAE J2412是SAE J1885的替代标准。SAE J2412同样要求采用配有“紫外延展”过滤器的氙灯来产生地球表面一般没有的短波紫外光。测试循环包括光照周期、暗周期,没有水喷淋循环。光强控制点为340 nm。表2为该标准规定的测试循环。

(3) AATCC TM16

该标准由美国AATCC协会制订,用于纺织品测试。AATCC TM16要求采用配有窗玻璃过滤器的氙灯来模拟产生透过标准窗玻璃的阳光光谱。光强控制点为420 nm。表3为该标准规定的测试循环。

(4) 曝晒时间

根据不同材料决定曝晒时间。性能最差的材料(如蓝羊毛L2)曝晒时间最短,耐候性好的(如汽车面漆)曝晒时间可长达500 h。总之,测试时间应确保材料取得有效的老化,但不需作过度的老化。

3.5 老化测量

(1) 颜色测量

聚苯乙烯和蓝羊毛要求初始的和最终的颜色测量。颜色测试按ASTM D2244的要求进行,测量使用积分球式分光光度计,并采用: CIELAB颜色体系, D65光源; 10°视角; 镜面光包含(SCI)和紫外光包

含(请确认)。用 Δb^* 表示塑料的黄变、用 ΔE^* 表示蓝羊毛的褪色。

由于聚苯乙烯是透明的材料,所以颜色测量时需衬有白色的校准板。同样,蓝羊毛为织物,测量时需加衬另一块蓝羊毛。此外,蓝羊毛是有方向性的,测试色差时,取90°夹角的两次测量的平均值。测试前,蓝羊毛测试样品应在标准条件下放置4 h。

(2) 龟裂

汽车面漆每天应进行多次的裂纹检测。当样品表面的裂纹达到10条时,应取出该样品并记录老化时间。其余样品则继续测试,直到所有被测样品出现10条裂纹。

3.6 参与研究的实验室

共有6家实验室参与本次研究,其中3家为涂料制造商实验室、2家为通过A2LA认证的独立实验室、1家为仪器生产商实验室。这6家实验

表1 SAE J2527规定的测试循环

时间	灯管	光强 (w/m ² @340 nm)	黑板温度 /°C	空气温度 /°C	相对湿度 /%	水喷淋	
1	0: 40	开	0.55	70	47	50	关
2	0: 20	开	0.55	70	47	50	开
3	1: 00	开	0.55	70	47	50	关
4	1: 00	关	无	38	38	95	开

表2 SAE J2412规定的测试循环

时间	灯管	光强 (w/m ² @340 nm)	黑板温度 /°C	空气温度 /°C	相对湿度 /%	水喷淋	
1	3:48	开	0.55	89	62	50	关
2	1:00	关	无	38	38	95	关

注:表2中结果的偏差不仅仅来源于设备的环境参数(如光强、温度、湿度、潮湿时间)的偏差,也已经包括材料本身和测量过程的偏差。

表3 AATCC TM16规定的测试循环

时间	灯管	光强 (w/m ² @340 nm)	黑板温度 /°C	空气温度 /°C	相对湿度 /%	水喷淋	
1	24:00	开	1.10	63	43	30	关

表4 试验数据汇总

材料	测试标准	氙灯试验箱		
		旋转鼓	样品静置 (位置轮替)	样品静置 (无位置 轮替, 不推荐)
蓝羊毛L2 △E*	SAE J2412	1 Ci4000(no.1) 9个样品 1天 实验室B	2 Xe-3-HS(no.1) 48个样品 1天 实验室F	3 Xe-3-HS(no.1) 55个样品 1天 实验室F
	AATCC 16	4 Ci65A(no.3) 18个样品 20H 实验室E	5 Xe-3-HS(no.4) 48个样品 20H 实验室F	6 Xe-3-HS(no.4) 55个样品 20H 实验室F
蓝羊毛L4 △E*	SAE J2412	7 Ci4000(no.1) 9个样品 3天 实验室B	10 Xe-3-HS(no.1) 48个样品 3天 实验室F	11 Xe-3-HS(no.1) 55个样品 3天 实验室F
		8 Ci65A(no.2) 9个样品 3天 实验室D		
		9 Ci65A(no.2) 9个样品 3天 实验室D		
	AATCC 16	12 Ci65A(no.3) 36个样品 4天 实验室E	13 Xe-3-HS(no.4) 48个样品 4天 实验室F	14 Xe-3-HS(no.4) 48个样品 4天 实验室F
聚苯乙烯 △b*	SAE J2412	15 Ci65A(no.2) 9个样品 8天 实验室D	16 Xe-3-HS(no.1) 48个样品 8天 实验室F	17 Xe-3-HS(no.1) 50个样品 8天 实验室F
	SAE J2527	17 Ci65A(no.1) 9个样品 7天 实验室A	18 Xe-3-HS(no.1) 48个样品 8天 实验室F	19 Xe-3-HS(no.3) 48个样品 8天 实验室F
汽车面漆 (开裂)	SAE J2527	21 Ci5000(no.1) 108个样品 至开裂 实验室C	22 Xe-3-HS(no.2) 28个样品 至开裂 实验室F	23 Xe-3-HS(no.5) 34个样品 至开裂 实验室C

室都有多年的氙灯测试经验。

3.7 试验结果

表4为25组不同测试数据的汇总, 列明了材料、测试方法、试验箱类型、测试编号、样品数量、测试时间和测试实验室代号 (出于保密原因, 实验室用代码表示)。

4 测试结果

表5列出了所有25组均匀性测试结果的数据。均匀性的数学表示为±2CV(加权变异系数), 其中,

$$CV = \frac{s}{\bar{x}}$$

式中, s为标准偏差, $s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$;

\bar{x} 为平均数值, $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$; n表示测试

样品的数量。

5 结论

根据材料类型和曝晒条件的不同, 旋转鼓式老化机的结果误差在±3%~±13%之间, 平板式氙灯试验箱的结果误差在±3%~±8%之间。

对某些样品而言, 平板式试验箱的均匀性好于旋转鼓式试验箱, 而某些样品则反之。

在平板式试验箱中, 样品定期轮换的测试结果的均匀性要好于样品位置固定时的测试, 这也是我们推荐定期轮换位置的原因。

6 建议

材料在氙灯试验箱中的老化均匀性是好的, 但仍然存在一定的偏差。所以, 当我们要在不同材料的相对耐久性能方面做出精确的结论时, 笔者推荐无论是旋转鼓式试验箱还是平板式试验箱^[18], 每个材料应至少测试3个以上的样品, 取其平均值, 且测试过程中定期轮换样品位置。

表5 测试结果均匀性对比

材料	测试标准	氙灯试验箱		
		旋转鼓	样品静置(位置轮替)	样品静置 (无位置轮替, 不推荐)
蓝羊毛L2 ΔE^*	SAE J2412	1 $\pm 9\%$ Ci4000	2 $\pm 5\%$ Xe-3-HS	3 $\pm 8\%$ Xe-3-HS
	AATCC 16	4 $\pm 9\%$ Ci65A	5 $\pm 5\%$ Xe-3-HS	6 $\pm 10\%$ Xe-3-HS
蓝羊毛L4 ΔE^*	SAE J2412	7 $\pm 13\%$ Ci4000 8 $\pm 7\%$ Ci65A 9 $\pm 4\%$ Ci65A	10 $\pm 5\%$ Xe-3-HS	11 $\pm 8\%$ Xe-3-HS
	AATCC 16	12 $\pm 8\%$ Ci65A	13 $\pm 8\%$ Xe-3-HS 14 $\pm 7\%$ Xe-3-HS	24 $\pm 11\%$ Xe-3-HS
聚苯乙烯 Δb^*	SAE J2412	15 $\pm 4\%$ Ci65A	16 $\pm 3\%$ Xe-3-HS	25 $\pm 10\%$ Xe-3-HS
	SAE J2527	17 $\pm 3\%$ Ci65A	18 $\pm 5\%$ Xe-3-HS 19 $\pm 8\%$ Xe-3-HS	20 $\pm 12\%$ Xe-3-HS
汽车面漆 (开裂)	SAE J2527	21 $\pm 13\%$ Ci5000	22 $\pm 8\%$ Xe-3-HS	23 $\pm 13\%$ Xe-3-HS

参考文献:

[1] Brennan, Fedor, Roberts, Xenon Arc Exposure Results: Rotating & Static Specimen Mounting Systems Compared, 5th International Symposium on Weatherability, Kogakuin University, Japan, Oct. 2002

[2] SAE J1960 Accelerated Exposure of Automotive Exterior Material Using a Controlled Irradiance Water Cooled Xenon Arc Apparatus

[3] SAE J1885A Accelerated Exposure of Automotive Interior Material Using a Controlled Irradiance Water Cooled Xenon Arc Apparatus

[4] AATCC Test Method 16, Colorfastness to Light

[5] VDA 621-430 Clear coats on 2 layer Metallic Coatings-Resistance Against Cracking

[6] Raabe, T., Quality Assurance of Short Term weathering Tests with the help of Control Charts, Proceedings

of the XXIIInd Colloquium of Danubian Countries on Natural and Artificial Aging of polymers, Berlin, Sept. 2001

[7] U.S. patent no. 4843893: Weathering Testing System

[8] U.S. patent no. 49957011: Weathering Testing System

[9] U.S. patent no. 5503032: High Accuracy Weathering Test Machine

[10] U.S. patent no. 5646358: High Accuracy Weathering Test Machine

[11] U.S. patent no. 6285137B1: Materials Test Chamber with Xenon Lamp Raidation

[12] U.S. patent no. 6525493B2: Materials Test Chamber with Xenon Lamp Raidation

[13] U.S. patent no. 5206518: Accelerated Weathering Apparatus

[14] Brennan, P.J. Static and Rotating Xenon Arc Exposures Compared: Technical Issues, Performance Based Test Methods Methods, 1st European Weathering Symposium, Proceedings

of the XXIIInd Colloquium of Danubian Countries on Natural and Artificial Aging of polymers, Berlin, Sept. 2001

[15] U.S. patent application Serial No. 10/343483: Multiple-Blower Relative Humidity Controlled Test Chamber

[16] SAE J2527 Accelerated Exposed of Automotive Exterior Material Using a Controlled Irradiance Xenon Arc Apparatus

[17] SAE J2412 Accelerated Exposed of Automotive Interior Trim Components Using a Controlled Irradiance Xenon Arc Apparatus

[18] Pausch, Brennan, Raymond, Calibration in Lab Exposure, Proceedings of the XXIIInd Colloquium of Danubian Countries on Natural and Artificial Aging of polymers, Berlin, Sept. 2001 