技术专论

航空有机玻璃加速老化试验技术研究

刘海燕，李喜明，王红斌
（中国飞机强度研究所，西安 710065）

摘要：介绍了导致有机玻璃老化的主要环境因素、加速老化环境谱的编制方法和有机玻璃的加速老化试验技术，对某飞机座舱盖有机玻璃进行了自然老化试验和加速老化试验，2种老化试验后有机玻璃疲劳试验结果的对比表明，提出的有机玻璃加速老化试验技术是可行、有效和适用的。

关键词：航空有机玻璃；环境因素；加速老化谱
中图分类号：V250.2　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2011)06－0083－04

Research on Accelerated Weathering Test Technique of Perspex

LIU Hai-yan, *LI Xi-ming*, *WANG Hong-bin*
(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi′an 710065, China)

Abstract: The main environmental factors of Perspex weathering, the compiling method of environmental spectrum of accelerated weathering, and the accelerated weathering test technique of Perspex were introduced. Environmental weathering test and accelerated weathering test of Perspex used for canopy were carried out. The feasibility, effectiveness, and applicability of the accelerated weathering test technique of Perspex were validated through contrast of the fatigue test results after the two kinds of weathering tests.

Key words: aircraft Perspex; environmental factor; accelerated weathering spectrum

有机玻璃因为具有优异的光学性能、比强度高和优良的热塑性加工性能，成为制作飞机座舱盖、风挡、观察窗等透明件的主要材料。有机玻璃又因为有很强的环境敏感性，其光学性能、强度性能与环境条件密切相关，要保证飞机有机玻璃构件的安全，需要通过试验研究其温度环境性能和老化性能。

目前，各发达国家对有机玻璃老化性能的研究主要采用实验室加速老化试验的方法进行。有机玻璃的加速老化试验技术是研究有机玻璃老化性能的关键，加速老化谱的编制是该技术的核心。文中主要介绍了加速老化谱的编制方法和加速老化试验技术。

1 有机玻璃老化的环境因素

有机玻璃属高分子材料，在自然环境作用下会发生老化。老化的结果从微观上讲就是分子链降

收稿日期：2011-08-05
作者简介：刘海燕(1968—)，男，陕西户县人，硕士，高级工程师，主要研究方向为飞机结构环境强度。

解、分子量降低，在宏观上表现为材料的透光率等光学性能和韧性、静强度、疲劳强度等强度性能降低。有机玻璃的老化，属于一种不可逆的光氧化反应，除去反应环境后，降解所导致的性能下降不能恢复。

大量研究表明，引起有机玻璃老化的气候环境因素有太阳光、氧、臭氧、温度、湿度等，其中温度、湿度和太阳光中的紫外线是老化的主要因素，紫外线为主导因素[1—2]。

2 有机玻璃加速老化谱编制原则

加速老化试验可以在达到自然老化效果的前提下缩短老化试验周期、降低试验费用。因此，加速老化与自然老化之间必须具备相关性，具体包括模拟性、重现性和加速性，同时要考虑试验的可实施性。

模拟性指的是加速老化能够模拟服役环境的主要老化因素，再现实际服役环境下的老化效果。具体表现为：加速老化和自然老化的老化机理一致，2种老化形成的老化特征一致，用2种老化形式同时试验多组材料时得到的材料耐老化的优劣顺序一致。重现性指的是在相同加速试验条件下，2次以上重复试验，结果无显著差异。加速性指在较短的时间范围内再现外场自然老化效果。

加速老化与自然老化之间能否具备良好的相关性，取决于加速老化环境谱的编制是否合理。为了实现该相关性，加速老化谱的编制必须遵循以下原则：

1）必须包含紫外线、温度和湿度这3个主要环境因素；

2）必须结合气象数据和飞机的实际使用情况合理地确定以上3个环境因素的量值范围、作用时间和作用顺序；

3）以紫外线作为老化的主导因素建立加速谱当量关系；

4）兼顾加速老化试验的可实施性。

3 环境因素强度量化

3.1 紫外线强度和作用时间的确定

3.1.1 紫外线波长的选取

太阳光是室外自然环境中的主要能源，其紫外线能量是光化学反应的主要引发源，红外线能引发热反应，实际上光化学反应和热反应往往是相伴发生。紫外线对有机玻璃的老化机理是光化学反应，即该波长范围的紫外线所具有的能量正好是组成有机玻璃材料的分子之间的键能，有机玻璃吸收紫外线能量后分子链断裂造成材料老化。

波长在300～400 nm的紫外线所具有的能量（0.297～0.401 MJ/g）正是许多高分子材料的键能（0.251～0.418 MJ/g）。不同高分子材料对紫外线的敏感波长又存在差异，表1给出了不同高分子材料的敏感波长。从表1[2]看出，这些高分子材料对紫外线的敏感波长大多在280～365 nm之间，有机玻璃（聚甲基丙烯酸甲脂）的敏感波长为290～315 nm。因此，为了兼顾键能和敏感性，在有机玻璃的加速老化谱中，紫外光源的波长范围应该取280～400 nm，在计算加速因子（f_a）时以290～315 nm的紫外线能量为准。

表1 高分子材料的吸收波长

Table 1 The absorbing wavelength of macromolecular materials

高分子材料	吸收波长/nm	高分子材料	含吸收波长/nm
聚乙烯	300	聚甲基丙烯酸甲脂	290～315
聚碳酸脂	285～305，330～360	聚乙烯—醋酸乙烯共聚物	327，364
聚氯乙烯	320	聚脂	325
聚苯乙烯	319	聚丙烯	300
聚甲醛	300～320		

3.1.2 紫外线强度的确定

为了保证加速老化与自然老化的相关性，在加速老化谱中，紫外线强度的确定必须兼顾以下几个方面：

1）紫外线强度值应取自然环境中太阳紫外线强度的峰值；

2）结合照射时间将加速老化谱的f_a控制在10以下；

3）结合可选用的紫外线光源。

目前，比较适合的紫外线光源有：

1）波长范围为280～320 nm、峰值为297 nm的UVB型荧光灯；

2）波长范围为315～400 nm、峰值为365 nm的UVA型荧光灯。

这2种灯管组合使用其辐射波长正好能模拟太

阳辐射中的紫外线波长,而且正好包含了有机玻璃的敏感波长,可以提供平均约0.05 MJ/(m^2·h)的紫外线能量。

如果选用0.05 MJ/(m^2·h)为加速老化谱的紫外线强度,通过照射时间的调整可以满足f_a小于10的要求,所以将加速老化谱的紫外线强度值确定为0.05 MJ/(m^2·h)比较合理。

在实际试验中,紫外线的强度与理论值会有所偏差而且会发生衰减,此时f_a发生了变化,在这种情况下,可以通过紫外线强度的实际测量值对f_a进行修正,通过延长试验时间达到加速老化的目的。

3.1.3 紫外线照射时间的确定

加速老化谱中,紫外线照射时间由期望的f_a、紫外线强度、紫外线照射时间以及在加速环境谱中的时间比例确定。

参照美国空军对高性能透明件系统的耐久性评定所采用的加速老化环境谱编制要求,结合海南紫外线辐射最严重日24 h中,日照时间大约为14 h。为了加速试验,用最严重日的日照时间作为加速老化谱每周期的紫外线照射时间,将紫外线照射时间暂定为14 h。用紫外线强度和照射时间计算的f_a为4.07;以24 h作为1个加速老化周期,在剩余的10 h安排湿老化(凝露老化),时间满足要求,因此,在1个加速老化周期内包含14 h的紫外线照射时间是合理的。

3.2 温度、湿度及其作用时间的确定

飞机在实际使用中,紫外线的老化作用虽然最大,但是温度和湿度也是材料老化的主要原因。加速老化环境谱中的温度和湿度参数要根据飞机使用中的实际环境确定。

以海南地区为例,海南年平均气温为21.9 ℃,最高气温为37.7 ℃,单日高温持续时间约4 h,风挡、座舱盖有机玻璃在机场停放时的实际温度要比当地气温高出约8 ℃[3]。因此在加速老化谱中,最高温度可定为50 ℃,持续时间为4 h。

由于南方环境潮湿,空气湿度较大,而且湿度又是有机玻璃老化的主要因素之一,所以在加速老化谱中必须包含湿度因素。

对湿度的考虑包括2方面:1)高温情况下的高湿,即考虑湿热综合作用的老化,可以在上述高温4 h段附加相对湿度为90%;2)夜间凝露,即薄液膜老化,模拟海南的实际情况,在14 h光照结束、自然降温1 h后,施加连续9 h的相对湿度大于70%的纯湿环境。

4 加速老化环境谱及f_a的确定

以前开展的有机玻璃自然老化研究,已经建立了自然老化与全国主要地区实际使用的当量关系,因此,现在只需要建立实验室"标准老化谱"与自然老化的当量关系即可得出实验室加速老化与各主要机场实际使用的当量关系。

4.1 加速老化环境谱

根据相关性要求,针对海南自然环境确定了有机玻璃加速老化环境谱的环境因素,各环境因素的强度和作用时间,得到了以24 h为一个周期,其中紫外线照射14 h(约0.05 MJ/(m^2·h)),在14 h中包含4 h的高温、高湿(50 ℃,90% RH)环境,降温1 h、凝露9 h的航空有机玻璃加速老化环境谱如图1所示。

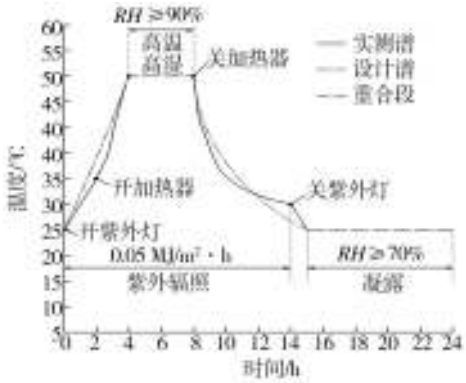

图1 有机玻璃加速老化谱

Fig. 1 The accelerated weathering spectrum of Perspex

4.2 加速老化环境谱f_a的确定

有机玻璃加速老化谱的f_a依据紫外线能量计算,f_a的2种计算方法[4]如下。

1)在紫外线波段某一范围内,规定时间内试验设备的紫外线辐射量理论值Q_R与某地区相应波段太阳紫外线总辐射量Q_Z之比为当量关系f_{aQ}为:

$$f_{aQ}=Q_R/Q_Z \tag{1}$$

由于有机玻璃的紫外线敏感波段在280~315 nm之间,因此仅取这一波段的Q_R和Q_Z计算AF_Q。

2）若材料疲劳性能降低到相同程度所需要的自然老化时间为t_Z，需要的加速老化时间为t_R，则当量关系f_{at}[5]为：

$$f_{at}=t_Z/t_R \tag{2}$$

一般情况下，f_{aQ}可以作为加速老化谱的设计值，由于试验过程中的许多不可控制因素的存在，f_{aQ}与f_{at}会有偏离，当量关系以f_{at}为准。

4.3 加速老化环境谱f_a的试验修正

在实际试验中，因为紫外线光源的照射强度会随时间发生衰减，试验设备的实际紫外线辐射量Q'_R与理论值Q_R会有所偏差，此时当量关系发生了变化。在这种情况下，可以通过照射强度的跟踪测量值计算Q'_R见式（3）。用式（4）重新计算当量关系f_{aQ}，也可以通过延长试验时间达到加速老化的目的。

$$Q'_R = \int_0^t q\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：q为紫外线光源的照射强度；t为紫外线光源的照射时间。

$$f_{aQ}=Q'_R/Q_Z \tag{4}$$

5 加速老化试验实施及试验实例

5.1 加速老化试验设备

标准紫外线老化设备一般具备实现温度、湿度、紫外线环境谱功能，对于平板试验件一般采用标准紫外线老化设备进行即可。

对于边缘连接件、圆弧风挡结构件、座舱盖结构件等非平板试验件，标准紫外线老化设备就不能满足试验要求，需要根据试验件的形状设计专用的紫外线灯管支架、反射板、试验件支架等，再借助湿热环境箱实现加速老化谱，如图2和图3所示。

5.2 试验中加速老化实测谱

由于紫外老化设备一般不具备致冷功能，在实际老化试验中，温度、湿度随时间的关系和设计的加速老化谱（如图1所示）很难完全吻合，研究证明这对试验结果基本上不产生影响[2]。所以，图1的实测老化谱是完全可以接受的。

随着试验的进行，紫外线强度q会逐渐衰减，当紫外线强度降低到初始值的80%，应该更换新灯管，以避免因试验时间过分延长而导致加速老化谱丧失相关性、使试验结果失真。

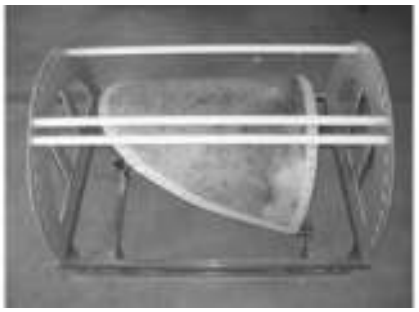

图2 曲面构件及紫外灯架

Fig. 2 The curved sample and the frame with UV lamp

图3 湿热箱内的加速老化试验

Fig. 3 Accelerated weathering test in moisture-thermal chamber

5.3 试验实例

曾经对某座舱盖有机玻璃在海南进行了1 a的自然老化试验，并用图1的加速老化谱进行了1个当量年的实验室加速老化试验，然后对完成试验的有机玻璃进行疲劳试验。

由于在这次加速老化试验的设计阶段，预先对紫外线光源的照射强度q的衰减进行了测定，Q_R直接用式（3）计算，加速老化谱的当量关系直接使用实际测量值f_{aQ}=4.1，因此在试验实施中不再需要对当量关系进行修正。试验时间t_R根据自然老化时间t_Z和当量关系计算，见式（5）。

$$t_R=t_Z/f_{aQ}=365/4.1=88 \tag{5}$$

自然老化1 a后，该有机玻璃的疲劳性能降低了11.43%；加速老化88个周期后，该有机玻璃的疲劳性能降低了10.76%。显然，2种老化历程的老化效

（下转第106页）

标，并敦促承制方从研制、生产的角度开展费用与功能特性、进度和可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性、环境适应性之间的权衡工作。根据舰船装备研制阶段地深入，权衡工作需要不断细化。费用作为独立变量实施时，订购方和承制方必须建立密切的联系和提高信息披露的透明度。订购方从部门内部的职能机构到各审价部门都要提供费用估算与分析的信息。承制方进行费用估算分析时也应该为费用与功能特性、进度等的权衡提供相关的研制、生产的信息。双方达成这一系列活动的默契程度关系到费用的估算精度。参数的跟踪和测评要包括费用构成的要素，如单元费用、环境条件、故障隔离和检测率、安全性等级、平均故障间隔时间（MTBF）、平均修复时间（MTTR）和平均后勤延误时间（MLDT）等。通常，费用作为独立变量的管控准则如下：

1）以费用目标为准则，假设的费用目标应该对一系列费用要素做通盘的考虑，这些要素包括可利用的资源、相似装备、系统效能、高新技术和拟采取的措施等，通过假设的费用目标和考虑到的要素可确定出费用目标备选方案；

2）以经济承受性为准则，通过与历年的可用资金比对，并根据作战需求和其它相关要求提出装备的费用预算范围，该预算范围是基于装备的经济承受性而确定的实际可用的经费，通过资金比对和费用预算可确定出初始的费用目标；

3）以系统效能为准则，分析作战需求和备选方案，并由此对装备系统效能以及费用要求进行评估，通过系统效能以及费用要求评估可确定出待定的费用目标；

4）以参数跟踪和性能测评为准则，参数跟踪和性能测评是保证费用模型有效的必要工作，通过参数跟踪和性能测评可确定出最终的费用目标。

5 结论

CAIV是舰船装备研制管理中控制费用的关键技术。CAIV的管理技术的利弊已经在某些典型的舰船装备研制过程中得到验证，其结果是利大于弊。运用费用作为独立变量技术并切实落实定费用设计和产品与过程的综合研制要求，订购方和承制方将在舰船装备的费用、功能特性、进度、可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性、环境适应性之间获得最佳的平衡。

参考文献：

[1] 施建荣. 舰船装备寿命周期费用控制与管理[J]. 船舶工程，2003（2）：15—18.

[2] 施建荣. 基于五性的舰船装备使用与保障费用估算[J]. 船舶标准化与质量，2010（4）：12—15.

（上接第86页）

果基本相当[5]。以疲劳强度下降程度建立的实际当量关系f_{at}=（10.76/88）/（11.43/365）=3.90，f_{aQ}与f_{at}的偏差仅为5%。

6 结论

按计算获得的有机玻璃的加速老化谱的当量，可推算实验室加速老化试验88 d相当于自然老化1 a；按有机玻璃实际疲劳性能下降计算，有机玻璃的加速老化谱当量为3.90。

参考文献：

[1] 黄宝臣. 有机玻璃全紫外线人工加速老化试验阶段总结[J]. 飞机设计，1996（1）：38—45.

[2] 胡桂珍，陈群志. 座舱盖玻璃环境试验研究[R]. 西安：中国飞机强度研究所，1995.

[3] 中国兵器工业第五九研究所. 北京等五地区环境数据[M].（余不详）

[4] 许风和. 飞机座舱透明材料大气老化与使用当量关系的研究[J]. 航空学报，2001，22（1）：72—79.

[5] 刘海燕. 综合环境下座舱盖有机玻璃疲劳性能研究[D]. 西安：西北工业大学，2005.