

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.019

玻纤增强聚碳酸酯电表外壳的寿命预测

陈金¹, 卢焱华¹, 董建金¹, 彭海志², 欧志勇², 刘灵芝²

(1. 威胜集团有限公司, 长沙 410000; 2. 长沙伟泰科技有限公司, 长沙 410000)

摘要: 针对玻纤增强聚碳酸酯(GFPC)外壳寿命预测的研究多集中于材料标准样条,而忽略了实际产品因加工应力、结构非均匀性及壁厚差异影响带来的问题,为满足产品级可靠性设计与快速验证的工程需求,开展了系统的对比研究与模型构建。本研究选取两个厂家的GFPC原料,分别制备了厚度为2.5 mm的电表外壳切割样条与厚度为4.0 mm的标准注塑样条,在70 °C/95%RH、75 °C/95%RH、75 °C/90%RH、85 °C/85%RH、90 °C/95%RH五种条件下进行加速湿热老化实验,以力学性能保持率低于70%作为失效判据,获取样条失效时间数据。通过对实验数据的整理、异常值处理与标准化,基于Hallberg-Peck模型,采用多元线性回归方法拟合得到各组寿命预测模型参数。结果表明,四组样条的湿热老化机制一致,活化能平均值为0.93 eV,湿度指数均为3,表明材料来源与样条形态及厚度差异未改变其老化的核心化学反应路径。基于参数一致性,建立了适用于智能电表外壳的统一寿命预测模型,该模型决定系数均高于0.995。模型计算表明,在70 °C/95%RH加速条件下,其加速因子为287.58,进行487 h实验即可等效于25 °C/70%RH环境下16年的服役寿命。本研究构建的模型及提出的基于加速因子的验证方法,为GFPC电表外壳的可靠性设计、选型与快速寿命评估提供了参考。

关键词: 电表外壳;玻纤增强聚碳酸酯;湿热老化;寿命预测;加速试验;Hallberg-Peck模型

中图分类号: TM933 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0156-07

Life prediction of the electric meter housing made of glass fiber reinforced polycarbonate

CHEN Jin¹, LU Chihua¹, DONG Jianjin¹, PENG Haizhi², OU Zhiyong², LIU Lingzhi²

(1. Wasion Group Co., Ltd., Changsha 410000, China; 2. Vitae Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China.)

Abstract: In order to meet the engineering requirements of product level reliability design and rapid verification, systematic comparative research and model construction have been carried out for the prediction of the service life of glass fiber reinforced polycarbonate (GFPC) meter enclosures, which mainly focuses on material standard specimens and lacks consideration of key issues such as processing stress, structural non-uniformity, and wall thickness differences in actual products. Raw materials from two manufacturers were used to prepare two types of specimens: 2.5 mm-thick samples cut from finished enclosures and 4.0 mm-thick standard injection-molded splines. Accelerated damp heat aging experiments were conducted under five conditions: 70 °C/95%RH, 75 °C/95%RH, 75 °C/90%RH, 85 °C/85%RH, and 90 °C/95%RH. The retention rate mechanical property below 70% was used as the failure criterion to obtain failure time data. By organizing experimental data, handling outliers, and standardizing (Z-score), based on the Hallberg-Peck model, multiple linear regression was used to fit to obtain the parameters of the life prediction models for each group. The results indicate that damp heat aging mechanisms of the four sets of samples are consistent, with an average activation energy of 0.93 eV and a humidity exponent of 3, indicating that the material source and the shape and thickness variations of the splines do not alter the core chemical reaction pathway of aging. Based on parameter consistency, an unified life prediction model applicable to smart meter casings was established, whose determination coefficients (R^2) were all higher than 0.995. The model calculation shows that under the acceleration condition of 70 °C and 95%RH, the acceleration factor is 287.58. Conducting 487 h of experiments can be equivalent to a service life of 16 years under 25 °C and 70%RH environment. The model constructed in this study and the proposed validation method based on acceleration factor provide a direct theoretical basis for the reliability design,

通信作者: 卢焱华, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电表产品以及元器件

收稿日期: 2025-11-25

引用格式: 陈金, 卢焱华, 董建金, 等. 玻纤增强聚碳酸酯电表外壳的寿命预测[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 156-162.

CHEN Jin, LU Chihua, DONG Jianjin, et al. Life prediction of the electric meter housing made of glass fiber reinforced polycarbonate[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 156-162.

selection, and rapid life assessment of GFPC meter casings.

Keywords: electric meter housing; glass fiber reinforced polycarbonate; damp heat aging; life prediction; accelerated testing; Hallberg-Peck model

聚碳酸酯(PC)因其优异的力学性能、光学性能与耐候性^[1-3],被广泛应用于智能电表等户外电子设备外壳。然而,在长期湿热环境作用下,PC材料易发生水解、分子链断裂等老化现象,导致力学性能下降,影响设备密封性与结构完整性。玻璃纤维增强聚碳酸酯(GFPC)通过玻璃纤维(GF)增强改性显著提升了PC材料的刚性、热稳定性及抗蠕变性能,现已成为智能电表外壳的主流材料之一。温度与湿度是导致材料基体老化的两个关键因素^[4-5],在产品设计及制造领域,外壳作为保护内部组件的关键结构,其耐湿热老化性能与抗户外光照能力直接影响产品的使用寿命与可靠性^[6]。尤其在高温高湿环境中,外壳易出现高分子材料降解、力学性能下降等老化失效问题^[7],导致产品表面开裂、密封性能受损,埋下安全隐患。随着国家电网对智能电表服役寿命提出不低于16年的严格要求,如何准确预测GFPC外壳在湿热环境下的使用寿命,已成为产品可靠性设计与质量评估的关键问题。

目前,相关研究多集中于材料本征性能分析,缺乏针对实际产品构件的寿命模型与快速验证方法。同时,关于GFPC寿命预测的研究对象多为标准样条,而针对智能电表外壳这类实际产品构件,因其加工成型过程中会产生玻纤取向、内应力等结构非均匀性问题,其服役寿命与标准样条存在差异,针对该类构件在真实服役环境下的寿命模型研究仍较为缺乏。因此,本研究通过对比标准样条与成品切割样条,系统评估材料本征性能与实际构件性能之间的差异,并构建适用于产品级的寿命预测模型。

本文以传统 Hallberg-Peck 模型为基础,引入了多组别对比,选取 GFPC 智能电表外壳成品样条与标准样条为研究对象,通过多组湿热老化实验,系统分析其性能退化规律,构建面向产品级的寿命预测模型,并采用 Z-score 标准化与拉依达准则进行异常值处理,提升了模型拟合的稳健性与预测精度。此外本研究将多元线性回归分析与材料加工工艺差异相结合,揭示了成型工艺对寿命模型参数的影响机制,并建立一套基于加速因子的工程验证方法,旨在为智能电表外壳的可靠性设计、材料选型

与寿命评估提供理论与实践支撑。

1 理论模型

1.1 Hallberg-Peck 模型

在实际应用中, Hallberg-Peck 模型作为一种重要的寿命加速预测模型,主要用于描述材料失效与温度、湿度之间的关系^[8-9]。该模型的核心原理基于化学反应速率理论,认为温度和湿度是影响材料失效的关键因素,且失效速率与温度呈指数函数关系,与湿度呈幂函数关系。Hallberg-Peck 模型同时兼顾温度与湿度的协同作用,可精确模拟在特定湿热环境下开展的加速老化试验过程,进而预测材料在不同环境条件下的寿命,为产品设计和维护提供依据。

GFPC 材料在长时间温湿度耦合老化条件下,主要发生热氧老化降解反应。在分子链降解与交联反应的作用下,材料内部结构发生变化,宏观上表现为力学性能的显著下降^[10-12]。Hallberg-Peck 模型是广泛应用于高分子材料湿热老化寿命预测的经典模型,可以用于 GFPC 材料寿命预测建模,该加速模型表达式^[13]见式(1)。

$$L = A \cdot H^{-n} \cdot \exp \frac{E}{kT} \quad (1)$$

式中: L 为产品的特征寿命,单位 h; A 为与材料有关的常数; H 为相对湿度,单位%,模型计算时归一化到 0~1; n 为湿度影响的幂指数(常数); E 为激活能,单位 eV; k 为玻尔兹曼常数,取值 8.62×10^{-5} eV/K; T 为绝对温度,单位 K。

为了便于进行参数估计和分析,对等号两边同时取自然对数,将其转化为线性化形式,见式(2)。

$$\ln L = \ln A - n \cdot \ln H + \frac{E}{k} \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

为方便数据分析,这个最终形式可以被看作一个多元线性方程。其中,因变量 $y = \ln L$, 自变量 $x_1 = \ln H$, $x_2 = 1/T$, 所得多元线性方程见式(3)。

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 \quad (3)$$

式中: $\beta_0 = \ln A$; $\beta_1 = -n$; $\beta_2 = E/k$ 。

这就是 Hallberg-Peck 模型的线性化形式。通过这种线性化转换,可以利用多元线性回归方法对模型参数进行估计和分析,提高模型的应用效率和准确性。

1.2 多元线性回归与最小二乘法

多元线性回归是一种广泛应用的数据分析方法^[14-15],其核心目的是通过构建线性方程来准确拟合多个自变量与一个因变量之间的关系。可用于深入探究多个环境因素(如温度、湿度等)对材料失效时间的综合影响。最小二乘法是多元线性回归中求解回归系数的常用且有效的方法^[16-17],其核心思想是最小二乘准则,即通过最小化模型预测值与实际观测值之间的差异,通常用残差平方和(SSE)表示,用来确定回归系数的值,从而得到最优的线性回归模型。具体数学操作是,将SSE对各回归系数分别求一阶偏导数并令其为零,由此得到一组线性方程(称为正规方程组)。求解该方程组,所得解即为能使SSE最小的回归系数估计值。从几何意义上理解,最小二乘法是在多维空间中寻找一个超平面,使得所有数据点到该超平面的垂直距离的平方和最小。这个超平面就是我们所求解的多元线性回归模型。

具体公式推导如下:设设计矩阵 X 为 $n \times (k+1)$ 矩阵,其中第一列全为1(对应截距项),其余列分别为自变量 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 的值;因变量向量 Y 为 $n \times 1$ 向量,包含 n 个观测值。则回归系数向量的最小二乘估计量见式(4)。

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

通过这种方法求解得到的回归系数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$,能够使模型在给定数据下达到最优的拟合效果,为后续分析和预测提供可靠的基础。

2 实验部分

2.1 主要原材料

GFPC:GF质量分数为10%,冷灰1U,工业级,来自中国的两个不同生产厂家,标记为厂家A和厂家B。

2.2 主要仪器及设备

注塑机:MA1200,宁波海天塑机集团有限公司;

万能电子拉力机:BY-126B,北京普桑达仪器科技有限公司;

悬臂梁冲击试验机:TF-2056B,扬州市天发试验机械有限公司。

2.3 试样制备

2.3.1 外壳成品样条制备

将GFPC原材料在120℃的真空干燥箱中烘干

4h以去除水分。随后,采用电能表常用外壳模具注塑成外壳(尺寸符合国家电网智能电表外壳标准)。具体注塑参数为:料筒温度分三段控制,分别为270、270、265℃,射嘴温度为135℃,模具温度恒定为50℃。图1展示了外壳成品样条的切割取样位置,由图1可知,成品样条取自外壳底部。该区域为电表安装与使用过程中的受力集中区域,可有效反映材料老化性能对实际构件的影响。外壳成品样条为哑铃状,与力学性能测试标准样条外形一致,用于评估实际制件性能及加工取向、内应力的影响。外壳成品样条平均尺寸为:长度150mm,宽度10.3mm,厚度2.5mm(按实际应用产品的厚度)。A、B两个厂家的GFPC制备的外壳成品样条分别记为A1、B1,各制备600根。

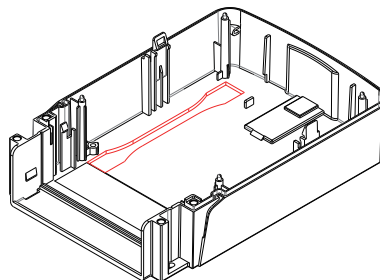


图1 外壳成品样条取样位置

Fig. 1 Sampling location for finished shell product samples

2.3.2 标准样条制备

根据GB/T 1040.2-2022的规定,使用2.3.1中相同的原材料与注塑工艺参数制备标准样条。成型后,为消除内应力,将样条置于120℃真空干燥箱中退火处理2h,随后自然冷却至室温。标准样条为哑铃状,平均尺寸为:长度150mm,宽度10mm,厚度4mm。A、B两个厂家的GFPC制备的标准样条分别记为A2、B2,各制备600根。

2.4 测试与表征

2.4.1 力学性能测试

V形缺口冲击强度根据GB/T 1843-2025采用悬臂梁冲击试验机测试。拉伸强度和断裂伸长率根据GB/T 1040.1-2025采用万能电子拉力机测试,拉伸速率为50mm/min。

2.4.2 湿热老化试验

实验前,从每种样条中随机抽取50根,测量其缺口冲击强度、拉伸强度及断裂伸长率,取测试结果的平均值作为样条的力学性能初始性能值。湿热老化试验在恒温恒湿箱中进行,对A1、B1、A2、B2样条分别进行5种不同测试条件的湿热老化试

验,每种测试条件下的样品数量为90根。5种测试条件(温度/相对湿度)分别为70℃/95%RH、75℃/90%RH、75℃/95%RH、85℃/85%RH、90℃/95%RH。

性能监测方案如下:依据温湿度严酷等级,初步设定取样间隔(10、5、1 d或8 h)。每间隔期从各条件试验箱中取出10根样条,经3 h室温恢复后,进行力学性能测试。测试结果取平均值后与初始性能值对比,计算力学性能保持率。当出现缺口冲击强度、拉伸强度和断裂伸长率其中一个的力学性能指标保持率低于70%时,判定样条失效,记录取样时间及结果。70%的力学性能保持率是一个源于大量工程实践和经验的安全临界值,此时材料虽然没有完全失效,但其性能已经发生了显著且不可忽视

的退化。取样频率将根据性能保持率动态调整:一旦某项指标呈现下降趋势,立即提高取样频率、缩短间隔;直至某项指标确认失效,则终止试验,并记录对应的失效时间。

3 结果与讨论

在湿热老化实验的5种测试条件下,外壳成品样条和标准样条的失效时间及对应的力学性能保持率见表1。实验结果显示,所有样条的缺口冲击强度、拉伸强度、断裂伸长率均随老化时间延长而降低,其中缺口冲击强度变化最为显著(最大降幅达45%),是最敏感的失效判定指标;拉伸强度与断裂伸长率降幅相对较小(最大降幅分别为15%、25%),且在部分温湿度条件下(如70℃/95%RH)仍能保持较高水平(>90%)。

表1 湿热老化实验结果
Tab. 1 Results of damp heat aging

Samples	Instructions	70℃/95%RH	75℃/95%RH	75℃/90%RH	85℃/85%RH	90℃/95%RH
A1	Notched impact strength	Failure@1 296 h	Failure@960 h	Failure@960 h	Failure@532 h	Failure@80 h
	Tensile strength	91%@1 296 h	90%@960 h	91.47%@960 h	84.49%@532 h	89.55%@80 h
	Elongation at break	76%@1 296 h	77%@960 h	79.06%@960 h	86.57%@532 h	75.80%@80 h
B1	Notched impact strength	Failure@1 320 h	Failure@984 h	Failure@960 h	Failure@528 h	Failure@120 h
	Tensile strength	95.00%@1 320 h	94%@984 h	85.76%@960 h	95%@528 h	94.12%@120 h
	Elongation at break	84.00%@1 320 h	79%@984 h	81.80%@960 h	77.53%@528 h	82.67%@120 h
A2	Notched impact strength	Failure@1 512 h	Failure@1 296 h	Failure@1 200 h	Failure@600 h	Failure@120 h
	Tensile strength	94%@1 512 h	90%@1 296 h	84.86%@1 200 h	91.58%@600 h	92.59%@120 h
	Elongation at break	77%@1 512 h	77%@1 296 h	78.54%@1 200 h	78.08%@600 h	79.91%@120 h
B2	Notched impact strength	Failure@1 560 h	Failure@1 320 h	Failure@1 296 h	Failure@624 h	Failure@120 h
	Tensile strength	96%@1 560 h	99%@1 320 h	98.03%@1 296 h	95.47%@624 h	96.62%@120 h
	Elongation at break	77%@1 560 h	74%@1 320 h	80.52%@1 296 h	83.25%@624 h	83.12%@120 h

Notes: failure@*t* denotes that the retention rate of mechanical properties fell below 70% at aging time *t*, which is defined as material failure in this study; *r*@*t* denotes that the retention rate of mechanical properties is *r* after aging for time *t*.

A1组样条在90℃/95%RH条件下,样条失效时间最短(80 h),且断裂伸长率保持率仅为75.80%,显著低于其他条件;而在70℃/95%RH条件下,样条失效时间最长(1 296 h),拉伸强度保持率仍达91%,表明较低的温湿环境能显著延缓材料老化。B1组样条的力学性能变化趋势与A1组一致,但相同温湿度条件下失效时间略长,如70℃/95%RH条件下为1 320 h,较A1组长24 h,拉伸强度保持率更高,如70℃/95%RH条件下为95.00%,较A1组高4个百分点,推测与厂家二原料中GF分散均匀性更好有关。

A2组样条在90℃/95%RH条件下,样条失效时间最短(120 h),而在70℃/95%RH条件下,样条失效时间最长(1 512 h),且此时拉伸强度保持率仍高达94%,断裂伸长率保持率稳定在77%左右,再次印证

了温度对材料老化的延缓作用。B2组样条的力学性能变化趋势与A2组一致,但在相同温湿度条件下表现出更优的耐久性:其失效时间在所有条件下均更长,如在70℃/95%RH条件下达1 560 h,为所有测试中的最长值,且拉伸强度保持率在各时间点均保持在95%以上,尤其在75℃/95%RH条件下仍高达99%。这一综合性能的显著提升,推测与B2组所采用的优化工艺或配方进一步增强了材料体系的稳定性有关。四组样条在不同温湿度条件下的失效时间汇总见表2。

对比相同工艺或材料来源的组别,在其他尺寸一致的情况下,成品外壳厚度2.5 mm,而标准样条4 mm,在全部五种温湿度加速老化条件下,两者材料耐久性不同。标准样条的失效时间显著延长,强度保持率普遍提高:尤其是在严苛条件(如90℃/

表2 不同湿热老化条件下样品的失效时间
Tab. 2 Failure time of samples under different damp heat aging conditions

Damp heat aging conditions	h			
	A1	B1	A2	B2
70 °C/95%RH	1 296	1 320	1 512	1 560
75 °C/95%RH	960	984	1 296	1 320
75 °C/90%RH	960	960	1 200	1 296
85 °C/85%RH	532	528	600	624
90 °C/95%RH	80	80	120	120

95%RH)下,标准样条的拉伸强度保持率(A2:92.59%,B2:96.62%)明显优于薄样条(A1:89.55%,B1:94.12%)。因为标准样条较厚,比成品外壳样条具有更高的截面积和更长的热、湿扩散路径,能有效减缓温湿度环境应力向材料内部的渗透速率,从

而延迟了因内部缺陷引发整体失效的过程。这是A2优于A1、B2优于B1的主要原因。

根据实际产品应用,成品外壳样条厚度会与标准样条偏薄,但两者之间是否相同的寿命预测关系,为进一步综合分析几种组别的标准样条和成品外壳样条,预测寿命关系,对数据进行整理分析,求取四种样条的Hallberg-Peck模型参数。

在数据整理阶段,对获取到的原始数据进行仔细的核对和清理,确保数据的准确性和完整性。并进一步将数据组织成适合多元线性回归分析的形式,为后续的模型构建和参数估计作好了准备。原始数据和相应的线性方程变量值见表3,包含三个变量 $x_1=\ln H, x_2=1/T, y=\ln L$ 。

表3 各变量数据
Tab. 3 Variable data

Temperature/°C	H(normalized)	T/K	$x_1=\ln H$	$x_2=1/T$	$y=\ln L$			
					A1	B1	A2	B2
70	0.95	343.15	-0.051 293 30	0.002 914 17	7.167 037 88	7.185 387	7.321 188 56	7.352 441
75	0.90	348.15	-0.105 360 52	0.002 872 32	6.866 933 28	6.891 626	7.167 037 88	7.185 387
75	0.95	348.15	-0.051 293 29	0.002 872 32	6.866 933 28	6.866 933	7.090 076 84	7.167 038
85	0.85	358.15	-0.162 518 92	0.002 792 12	6.276 643 49	6.269 096	6.396 929 66	6.436 150
90	0.95	363.15	-0.051 293 30	0.002 753 68	4.382 026 64	4.382 027	4.787 491 74	4.787 492

Notes: H is relative humidity; T is absolute temperature; L is characteristic lifespan, defined as failure time of samples in this study.

为消除异常值影响并避免数据丢失,本研究采用拉依达准则进行异常值识别与处理。对于识别出的异常值,采用将其替换为邻近数据点的均值的方法进行处理,保留数据的整体特征,避免了因直接删除异常值而导致的数据丢失和信息损失,提高数据的质量。拉依达准则基于正态分布的特性,认为在正态分布中,数据点通常集中在均值附近,而标准偏差表示数据的离散程度。根据正态分布的性质,大部分数据点(约68.26%)会分布在均值±1倍标准偏差之间,约有95.44%的数据点分布在均值±2倍标准偏差之间,而几乎所有的数据点(约99.7%)都会分布在均值±3倍标准偏差之间。因此,任何超出均值±3倍标准偏差的数据点都被认为是异常值。

在本研究中, $\ln H$ 和 $1/T$ 的量纲和取值范围都不同,为避免原始数据中量纲差异所导致的模型权重分配不合理问题,本研究对数据进行了Z-score标准化处理。该方法通过将各变量转换为均值为0、标准差为1的分布,有效消除了数量级影响,防止某些变量对模型产生过度支配。标准化后的数据不仅提升了多元线性回归分析的准确性与模型稳定性,也使得数据中内在的规律与关联得以更清晰地被

模型捕捉与学习。

经多元线性回归拟合,得到四组样条的Hallberg-Peck模型参数(见表4)。所有组别的决定系数(R^2)均高于0.995,表明模型拟合优度良好。值得注意的是,尽管样条类型不同,其激活能(E)与湿度指数(n)高度一致,平均值分别为0.93 eV与3,所有样条在该老化过程中遵循相似的反应级数。这明确表明,相同的材料,不同厂家制造,且厚度发生变化,并未改变其老化的化学反应本质与路径,即 E 不变。厚度提升的“阻隔效应”主要体现在物理上减缓了温湿度向材料内部的扩散与渗透速率,从而

表4 回归参数与模型参数
Tab. 4 Regression parameters and model parameters

Parameter	A1	B1	A2	B2
β_0	-24.118	-24.172	-24.118	-24.702
β_1	-2.999	-2.998	-2.999	-3.002
β_2	10 677.6	10 694.9	10 677.6	10 929.5
R^2	0.995	0.996	0.995	0.997
A	3.22×10^{-11}	3.10×10^{-11}	3.22×10^{-11}	1.86×10^{-11}
n	3	3	3	3
E/eV	0.920	0.922	0.920	0.942

Notes: $\beta_0=\ln A; \beta_1=-n; \beta_2=E/k; R^2$ is coefficient of determination; A is constants related to samples; n is humidity exponent; E is activation energy; k is Boltzmann constant.

延迟了整体性能的衰退,这在模型上体现为相同的加速因子,但实际使用中表现为更长的失效时间。

4 工程应用

不同厂家的塑胶原材料制成标准样条与成品外壳后,虽然成品外壳根据实际应用,厚度会偏薄,但两者的 E (平均值 0.93 eV)和 n (平均值 3)高度接近,系数 A 量级一致(10^{-11}),说明塑胶原材料的形态不影响寿命计算的核心参数,可基于四组数据的一致性建立面向智能电表外壳的统一寿命预测模型。材料特征寿命(L)的模型表达式见式(5)。

$$L = 2.535 \times 10^{-11} \times H^{-3} \times \exp \frac{0.93}{kT} \quad (5)$$

为便于工程应用,计算加速因子(正常条件下的寿命与加速条件下的寿命的比值),见式(6)。

$$F = (H_s/H_u)^3 \times \exp \left[(0.93/k) (1/T_u - 1/T_s) \right] \quad (6)$$

式中: F 为加速因子; H_s 与 H_u 分别为加速应力条件与正常工作条件下的相对湿度,单位%; T_s 与 T_u 则分别表示加速应力与正常工作条件下的绝对温度,单位K。

以材料的缺口冲击强度、拉伸强度以及断裂伸长率的力学性能保持率小于70%作为失效判据,根据加速模型,可以得出:70℃/95%RH条件下,加速因子为287.58,即该条件下487 h的加速实验等效于25℃/70%RH环境下16年的服役寿命;85℃/85%RH条件下,加速因子为768.64,仅需182 h实验即可完成16年寿命的等效验证,显著缩短了验证周期。

该模型可直接用于智能电表外壳的加速寿命测试设计,显著缩短开发周期,也为智能电表外壳的快速可靠性验证提供了工程化工具体系,统一了标准样条与成品样条的激活能与湿度指数,证实了模型在产品级构件中的适用性。揭示了成品样条与标准样条在老化行为上的一致性规律,为智能电表外壳的选材、结构与寿命评估提供了理论与实践依据,也为高可靠性要求的户外电子设备外壳选材与结构设计提供了实用化工具。

5 结论

(1)湿热老化实验中,成品外壳样条(厚度2.5 mm)与标准测试样条(厚度4 mm)虽然失效时间和力学性能保持率不同,但其湿热老化机理一致,核心动力学参数(E 、 n 、 A)基本保持一致,表明同种材

料的形态和厚度变化未改变材料的老化反应本质。

(2)基于Hallberg-Peck模型构建的智能电表外壳用GFPC统一寿命预测模型决定系数 R^2 均高于0.995,拟合优度良好。模型计算不同加速条件等效寿命,以力学性能保持率小于70%作为失效判据,70℃/95%RH条件下加速因子为287.58,487 h实验可等效模拟25℃/70%RH环境下16年的服役寿命。

参考文献

- [1] 李明远,王佳琪,刘畅.玻纤增强聚碳酸酯湿热老化过程中结构与性能演变规律[J].高分子材料科学与工程,2022,38(8):76-82.
LI Mingyuan, WANG Jiaqi, LIU Chang. Structure and property evolution of glass fiber reinforced polycarbonate during hygrothermal aging[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2022, 38(8):76-82.
- [2] 孙琦伟,王韬,许雪婷,等.正电子湮没谱表征热处理工艺对聚碳酸酯力学性能的影响[J].高分子材料科学与工程,2024,40(6):77-84.
SUN Qiwei, WANG Tao, XU Xueting, et al. Effect of heat treatment on mechanical properties of polycarbonate exposed by positron annihilation spectroscopy[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(6):77-84.
- [3] 葛勇,郑静,许雪婷,等.环境温度对聚碳酸酯力学性能的影响[J].航空材料学报,2023,43(3):87-93.
GE Yong, ZHENG Jing, XU Xueting, et al. Effect of ambient temperature on mechanical properties of polycarbonate[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(3):87-93.
- [4] 陈晓峰,赵文静,张磊.阻燃改性玻纤增强PC的耐环境应力开裂性能研究[J].塑料工业,2023,51(4):98-102.
CHEN Xiaofeng, ZHAO Wenjing, ZHANG Lei. Study on environmental stress cracking resistance of flame retardant modified glass fiber reinforced PC [J]. China Plastics Industry, 2023, 51(4):98-102.
- [5] 张艳君,毕静利,张超,等.湿热老化对聚碳酸酯性能的影响[J].山东化工,2019,48(15):27-29.
ZHANG Yanjun, BI Jingli, ZHANG Chao, et al. Effect of damp-heat aging on property and structure of polycarbonate[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(15):27-29.
- [6] 时宇,陶友季,杨湧波,等.不同气候环境条件对聚碳酸酯材料自然老化的光学性能影响[J].环境技术,2021,39(4):44-48,52.
SHI Yu, TAO Youji, YANG Yongbo, et al. Influence on optical properties of polycarbonate in various environmental conditions during natural weathering[J]. Environmental Technology, 2021, 39(4):44-48, 52.
- [7] 王洪亮,孙晓丽,李敏.智能电表外壳材料户外自然老化失效机制及影响因素[J].合成材料老化与应用,2022,51(3):45-49.
WANG Hongliang, SUN Xiaoli, LI Min. Outdoor natural aging failure mechanism and influencing factors of smart meter shell

- materials[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2022, 51(3):45–49.
- [8] 薛阳,张蓬鹤,王雅涛,等.智能电表可靠性评价方法研究与探讨[J].*电测与仪表*,2016,53(13):90–94,99.
- XUE Yang, ZHANG Penghe, WANG Yatao, et al. Study and exploration on reliability assessment method for smart meters[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(13):90–94, 99.
- [9] 黄丽娟,吴鹏,郑阳.电子设备外壳材料加速老化试验方案优化与周期确定[J].*环境技术*,2023,41(2):41–45.
- HUANG Lijuan, WU Peng, ZHENG Yang. Optimization and period determination of accelerated aging test schemes for electronic equipment shell materials[J]. *Environmental Technology*, 2023, 41(2):41–45.
- [10] 张伟,刘晓燕,王晨.基于多元回归的玻纤增强PC湿热老化性能预测模型[J].*济南大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(5):521–527.
- ZHANG Wei, LIU Xiaoyan, WANG Chen. Prediction model of hygrothermal aging properties of glass fiber reinforced PC based on multiple regression[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2022, 36(5):521–527.
- [11] 罗群,刘春雨,王尧,等.基于温湿度应力回归分析的智能电表性能退化研究[J].*济南大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(6):623–628, 648.
- LUO Qun, LIU Chunyu, WANG Yao, et al. Performance degradation of smart meters based on regression analysis of temperature and humidity stress[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2020, 34(6):623–628, 648.
- [12] 岑茵,陈勇文,艾军伟,等.高温湿热环境下玻纤增强PC的性能影响研究[J].*合成材料老化与应用*,2020,49(6):26–29.
- CEN Yin, CHEN Yongwen, AI Junwei, et al. Study on the performance of glass-fiber reinforced PC during hydrolysis aging[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2020, 49(6):26–29.
- [13] 卢炽华,张艳杰,卢思思,等.基于Hallberg-Peck模型的玻璃纤维增强PC的性能与寿命[J].*塑料工业*, 2022, 50(7):106–109, 156.
- LU Chihua, ZHANG Yanjie, LU Sisi, et al. Properties and lifetime of glass fiber reinforced polycarbonate based on hallberg-peck model[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(7):106–109, 156.
- [14] 王艳,李志强,刘敏.基于多元线性回归的高分子材料老化寿命预测模型[J].*统计学与应用*, 2023, 12(3):415–422.
- WANG Yan, LI Zhiqiang, LIU Min. Aging life prediction model of polymer materials based on multiple linear regression[J]. *Journal of Statistics and Applications*, 2023, 12(3):415–422.
- [15] 高继文.多元线性回归参数的估计[J].*西安文理学院学报(自然科学版)*,2023,26(3):1–5, 12.
- GAO Jiwen. Estimation of parameters in multiple linear regression[J]. *Journal of Xi'an University (Natural Science Edition)*, 2023, 26(3):1–5, 12.
- [16] 刘强,张建华,周明.最小二乘法在材料性能退化数据拟合中的应用及精度分析[J].*中国石油和化工标准与质量*, 2022, 42(18):89–91.
- LIU Qiang, ZHANG Jianhua, ZHOU Ming. Application and accuracy analysis of least squares method in material performance degradation data fitting[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2022, 42(18):89–91.
- [17] 张国华.最小二乘法线性回归分析及其测量不确定度探讨[J].*中国石油和化工标准与质量*, 2020, 40(15):72–73.
- ZHANG Guohua. Linear regression analysis of least square method and discussion on its measurement uncertainty[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2020, 40(15):72–73.