

# 塑料大气环境老化预测模型研究

杨小奎, 张伦武, 张世艳, 向江涛, 牟献良, 朱玉琴, 王莞

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** **目的** 为塑料老化行为预测提供简易而可靠的途径, 充分发挥环境效应数据的内在价值。**方法** 分别运用 GM(1,1)模型、幂函数模型、指数函数模型、多项式模型预测 9 种工程塑料在 3 种典型大气环境下的拉伸强度、延伸率和弯曲强度等力学性能变化, 并与自然环境试验实测结果进行比较。**结果** 拉伸强度、延伸率、弯曲强度等 3 种力学性能中, 弯曲强度预测效果最好, 延伸率预测效果最差。4 种模型之中, GM(1,1)模型在预测小样本数据方面具有最好的预测效果和最高的正确率, 且在数据具有一定波动性的情况下仍能够保持较好的预测效果。**结论** 在挖掘分析塑料大气老化评价指标和试验时间之间的函数关系时, 不仅要考虑预测模型的拟合效果好坏、相关系数高低、预测误差和预测正确率高低, 还应注意预测模型反映出来的塑料性能变化规律是否符合客观实际, 这样得到的预测模型才能尽可能地反映塑料老化程度与试验时间关系的全貌。

**关键词:** 大气环境; 塑料; 老化行为; 模型; 预测

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.007

**中图分类号:** TB114      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)03-0030-07

## Aging Prediction Model of Plastic Exposed in Atmosphere Environments

YANG Xiao-kui, ZHANG Lun-wu, ZHANG Shi-yan, XIANG Jiang-tao, MOU Xian-liang, ZHU Yu-qin, WANG Wan  
(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT: Objective** To provide simple and reliable method for prediction of plastic aging behaviour, and achieve the full value of environmental effect data. **Methods** The changes of tensile strength, ductility and bending strength for 9 kinds of engineering plastics, which were exposed in three types of representative atmospheric environments, were predicted with different models including GM(1,1) model, power function model, exponential model and polynomial model, and the calculated results were compared with actual measurement results of natural environment test. **Results** Among three mechanical properties, the prediction effect of bending strength was the best; while the prediction effect of ductility was the worst. Of the four prediction models, GM(1,1) model presented the best prediction effect and the highest accuracy. And good prediction effect was achieved when the data possessed the characteristics of fluctuation. **Conclusion** When the function relationship between atmospheric aging evaluation index and test time is explored and analysed, it is required to consider not only the fitting effect, correlation coefficient, prediction error and prediction accuracy but also the consistency of change law of plastic properties reflected by the prediction model and objective reality. Then the whole relationship between plastic aging degree and test time could be reflected as closely as possible by the prediction model.

**KEY WORDS:** atmospheric environment; plastic; aging behaviour; model; prediction

随着武器装备轻量化、低成本和特殊功能等要求的提出, 塑料在武器装备中获得了广泛应用。塑料在使用过程中普遍存在老化失效问题, 常常会导致意想不到的事故, 造成巨大的军事和经济损失, 对型号研制和重大工程选材造成很大风险。如海湾战争中, 美军在大规模沙漠军事演习时, AS90 自动火炮上的塑胶过滤器在高温下熔化, 影响了训练效果和战备需要<sup>[1-3]</sup>。塑料的环境适应性能否满足具体服役工况要求是装备和型号研制单位普遍关心的问题。虽然通过塑料老化试验可以解决这一问题, 但自然老化试验在某些情况下耗时很长, 可能数年, 甚至数十年。虽然所获数据十分宝贵, 却很难跟上材料研究和装备研制的高速发展, 而实验室加速老化试验与装备实际服役工况存在不可避免的差异<sup>[4-5]</sup>。针对这一状况, 近年来, 在已知自然环境试验数据的基础上, 建立数学模型, 对塑料的老化行为进行预测已成为研究人员关注的热点之一<sup>[6-13]</sup>。

塑料大气环境老化预测是指对塑料的大气环境适应性演化预先作出的科学推测, 既包含在同一时期根据已知环境适应性塑料推测未知塑料环境适应性的静态推测, 也包括根据塑料的历史和现状数据推测其未来环境适应性发展趋势的动态预测。由于自然环境试验的时间跨度长, 空间分布广, 腐蚀/老化影响因素复杂多变, 其环境效应数据通常具有高维度、小样本、数据分布蕴含层次结构、高噪声等特征, 这些都增加了环境效应数据挖掘分析的困难性。文中依托国防科技工业自然环境试验站网长期积累的材料大气腐蚀/老化试验数据, 运用 GM(1,1)模型、幂函数模型、指数函数模型、多项式模型对 9 种常用工程塑料在我国典型大气环境试验 5 年的大气老化性能进行了预测, 并对预测结果进行了比较, 获得了对选择塑料大气老化预测模型有参考价值的结论。以期对具有高维度、小样本、具有层次结构、数据质量较低等特点的材料环境效应数据挖掘和建模提供有益借鉴, 从而从不完备的环境效应数据中获得有意义的信息, 满足实际应用的需要, 充分发挥环境效应数据的内在价值。

## 1 预测模型

### 1.1 GM(1,1)模型

灰色 GM(1,1)模型预测是对含有不确定因素的系统进行预测的基本方法<sup>[14-15]</sup>。通过对原始数据的加工和生成处理, 使原始数据变成有规律的序列, 从而弱化数据的随机因素, 生成有较强规律性的数据, 预测事物未来的发展趋势。

设原始时间序列  $X^{(0)}$  有  $n$  个非负实际值(也称观测值或原始值):  $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2) + x^{(0)}(3) + \dots +$

$x^{(0)}(n)\}$ , 则 GM(1,1)模型的建立步骤如下。

1) 一次累加生成处理。一次累加生成也就是 1-AGO 序列生成, 灰色预测是基于灰色动态模型进行的预测。建立模型时, 需对原始数据进行“生成”处理, 使原始数据成为光滑离散函数。可由式(1)生成一次累加序列  $X^{(1)}$ ,  $X^{(1)} = \{x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3) + \dots + x^{(1)}(n)\}$ 。

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

2) 紧邻均值序列生成。由式(2)生成  $X^{(1)}$  的紧邻序列  $Z^{(1)}$ ,  $Z^{(1)} = \{z^{(1)}(1) + z^{(1)}(2) + z^{(1)}(3) + \dots + z^{(1)}(n)\}$ 。

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)], \quad k=2,3,\dots,n \quad (2)$$

3) 白化方程的建立及求解。称  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$  为 GM(1,1) 模型的基本形式。其中,  $a$  为发展系数,  $b$  为灰作用量。若  $\hat{a} = [a, b]^T$  为参数列, 且:

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$$

则 GM(1,1)模型模型的最小二乘估计参数列满足式(3)。

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

称  $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$  为模型 GM(1,1)的白化方程,

该白化方程的解为式(4):

$$\hat{x}^{(1)}(k) = [x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a}, \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (4)$$

其还原值应满足式(5):

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1) = (1 - e^{-a})(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-a(k-1)}, \quad k=2,3,\dots,n \quad (5)$$

$\hat{x}^{(0)}(k)$  即为由 GM(1,1)模型得到的原始值  $x^{(0)}(k)$  的模拟值。

4) 误差检验。由式(6)计算残差(即原始值与模拟值之差)。

$$\xi(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (6)$$

由式(7)计算相对误差。

$$\Delta_k \xi = \frac{|\xi(k)|}{x^{(0)}(k)}, \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (7)$$

### 1.2 幂函数模型

幂函数模型为:

$$Y = At^n \tag{8}$$

式中： $Y$ 为自然环境试验一定时间后塑料的力学性能； $t$ 为试验时间； $A$ 、 $n$ 为常数。

幂函数模型回归方程的相关系数，在规定的检验水平下应大于其相应的临界相关系数，且越接近于1，回归方程的效果越显著，拟合误差越小。

### 1.3 指数模型

指数函数模型为：

$$Y = ae^{bt} \tag{9}$$

式中： $a$ 、 $b$ 为常数。

指数模型回归方程的相关系数，在规定的检验水平下应大于其相应的临界相关系数，且越接近于1，回归方程的效果越显著，拟合误差越小。

### 1.4 多项式模型

多项式模型为：

$$Y = a + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \dots + \beta_n t^n \tag{10}$$

式中： $a$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_n$ 为常数。

多项式模型回归方程的相关系数在规定的检验水平下应大于其相应的临界相关系数，且越接近于1，回归方程的效果越显著，拟合误差越小。

对于一般情况，使用二次多项式即可。当使用三次或更高的次数能明显提高回归的效果时，才考虑使用更高次的多项式。

## 2 结果与讨论

增强聚碳酸酯、聚碳酸酯、增强尼龙6、ABS、聚砜、聚甲醛（上海）、聚甲醛（西德）、增强低压聚乙烯、增强低压聚乙烯等9种工程塑料在江津、万宁、碾子山等3个自然环境试验站户外暴露期间，其拉伸强度、延伸率、弯曲强度等力学性能的变化情况见文献[1]。利用工程塑料前4年户外暴露期间力学性能的变化数据预测工程塑料户外暴露5年力学性能，模型预测结果分别见表1—表3。

表1 工程塑料拉伸强度的保留率预测

%

试验材料	试验环境	拉伸强度保留率								
		5年实际值	GM(1,1)模型		幂函数模型		指数函数模型		多项式模型	
			预测值	误差	预测值	误差	预测值	误差	预测值	误差
增强聚碳酸酯	江津站	88	91.38	3.84	89.15	1.31	85.38	-2.96	99.58	13.15
	万宁站	80	80.70	0.87	80.99	1.24	78.87	-1.40	85.41	6.76
	碾子山站	78	91.65	17.5	92.11	18.09	89.56	14.83	94.98	21.77
聚碳酸酯	江津站	41	47.03	14.70	53.54	30.60	47.64	16.21	55	34.14
	万宁站	18	15.55	-13.61	23.26	29.26	17.53	-2.60	23.83	32.41
	碾子山站	41	35.17	-14.22	38.89	-5.13	34.51	-15.80	33.42	-18.47
增强尼龙6	江津站	64	62.87	-1.76	67.89	6.08	63.50	-0.77	66.02	3.16
	万宁站	51	47.88	-6.11	55.57	8.96	49.14	-3.63	55.4	8.62
	碾子山站	84	82.09	-2.27	80.85	-3.74	80.76	-3.85	77.59	-7.63
ABS	江津站	80	71.21	-10.98	80.51	0.63	77.77	-2.77	72.61	-9.23
	万宁站	66	75.72	14.72	79.94	21.13	78.42	18.82	125.4	90.00
	碾子山站	76	71.48	-5.94	81.22	6.87	81.22	6.88	64.71	-14.84
聚砜	江津站	95	93.02	-2.08	95.73	0.77	98.16	3.32	96.19	1.25
	万宁站	67	74.40	11.04	81.63	21.84	78.81	17.63	70.81	5.69
	碾子山站	87	91.36	5.01	93.44	7.40	94.17	8.24	92.98	6.87
聚甲醛（上海）	江津站	53	46.00	-13.20	51.14	-3.50	42.41	-19.97	61.99	16.97
	万宁站	32	34.04	6.37	24.91	-22.13	30.73	-3.96	50.6	58.12
	碾子山站	43	48.83	13.55	54.02	25.64	46.97	9.24	59.01	37.24
聚甲醛（西德）	江津站	32	25.75	19.53	24.91	-22.13	19.22	-39.92	46	43.75
	万宁站	17	17.73	4.29	16.96	-0.22	10.94	-35.60	51.41	202.44
	碾子山站	31	28.10	-9.35	27.47	-11.36	21.54	-30.50	48.22	55.54
增强低压聚乙烯	江津站	28	25.76	-8.00	29.50	5.38	20.70	-26.04	52.79	88.55
	万宁站	31	31.95	3.06	31.80	2.58	21.54	-30.50	60.03	93.66
	碾子山站	33	29.80	-9.69	35.90	8.80	27.69	-16.06	54.42	64.90
增强低压聚乙烯（加助剂）	江津站	52	53.76	3.38	59.36	14.16	54.96	5.69	62.81	20.79
	万宁站	48	53.67	11.81	53.86	12.22	48.56	1.17	67	39.58
	碾子山站	66	58.71	-11.04	66.68	1.03	59.96	-9.14	69.03	4.59
预测误差平均值				8.81		10.82		12.87		37.04

表 2 9 种工程塑料延伸率的保留率预测

%

材料	环境	延伸率保留率								
		5 年实际值	GM (1,1) 模型		幂函数模型		指数函数模型		多项式模型	
			预测值	误差	预测值	误差	预测值	误差	预测值	误差
增强聚碳酸酯	江津	99	132.04	33.37	133.68	35.03	151.40	52.93	106.8	7.87
	万宁	107	105.47	-1.43	111.22	3.95	114.71	7.21	98.97	-7.50
	碾子山	112	111.72	-0.25	108.93	-2.73	112.66	0.59	106.17	-5.20
聚碳酸酯	江津	5	—	—	—	—	—	—	—	—
	万宁	4	—	—	—	—	—	—	—	—
	碾子山	6	—	—	—	—	—	—	—	—
增强尼龙 6	江津	107	145.66	36.13	138.36	29.31	151.78	41.85	134	25.23
	万宁	104	96.19	-7.51	105.58	1.52	106.53	2.43	86	-17.30
	碾子山	93	83.46	-10.25	89.79	-3.45	86.49	-6.99	90.79	-2.37
ABS	江津	30	29.95	-0.16	31.84	6.15	24.81	-17.28	42.4	41.33
	万宁	25	24.53	-1.88	33.94	35.78	26.05	4.21	18.99	-24.02
	碾子山	41	37.45	-8.65	47.51	15.88	35.87	-12.50	55.23	34.71
聚砜	江津	61	50.71	-16.86	57.05	-6.47	50.62	-17.00	56.01	-8.17
	万宁	14	18.67	33.35	24.80	77.19	17.35	23.93	14.18	1.28
	碾子山	45	36.85	-18.11	38.50	-14.43	31.08	-30.92	54.8	21.77
聚甲醛 (上海)	江津	24	27.69	15.37	28.73	19.72	18.40	-23.31	68.18	184.08
	万宁	16	14.22	-11.12	15.17	-5.16	8.58	-46.33	55.12	244.50
	碾子山	20	21.71	8.55	21.37	6.87	13.58	-32.09	60.62	203.10
聚甲醛 (西德)	江津	14	16.71	19.35	16.60	18.60	9.07	-35.19	62	342.85
	万宁	12	11.67	-2.75	14.57	21.43	7.68	-35.94	51.39	328.29
	碾子山	0	—	—	—	—	—	—	—	—
增强低压聚乙烯	江津	33	41.37	25.36	43.94	33.18	33.30	0.93	65.2	97.57
	万宁	42	37.70	-10.23	40.85	-2.72	29.40	30.00	67	59.52
	碾子山	33	39.37	19.30	43.31	31.25	32.60	-1.19	65.78	99.33
增强低压聚乙烯 (加助剂)	江津	60	62.20	3.66	77.16	28.61	76.24	27.07	43.79	-27.00
	万宁	95	99.71	4.95	104.16	9.64	103.87	9.33	99.40	4.63
	碾子山	75	83.22	10.96	68.16	-9.11	67.63	-9.82	79.6	6.13
预测误差平均值				13.02		18.18		20.39		77.99

从表 1—表 3 可以看出,采用灰色 GM(1,1) 模型得出的 9 种工程塑料在 3 个自然环境试验站中,拉伸强度、延伸率、弯曲强度的预测值与实际值的相对误差平均值分别为 8.81%、13.02%、8.99%。从工程塑料性能单个预测误差来看,预测拉伸强度 5 年变化的 27 组数据中,只有 1 组数据预测误差超过 15%,占比为 3.7%,正确率为 96.3%。预测延伸率 5 年变化的 23 组数据中,有 6 组数据预测误差超过 15%,占比为 26.1%,正确率为 73.9%。预测弯曲强度 5 年变化的 27 组数据中,只有 3 组数据预测误差超过 15%,占比为 11.1%,正确率为 88.9%。可以看出,GM(1,1)模型预测工程塑料单个力学性能的正确率从大到小依次为拉伸强度、弯曲强度、延伸率。

采用幂函数模型得出的 9 种工程塑料在 3 个自然环境试验站中,拉伸强度、延伸率、弯曲强度的

预测值与实际值的相对误差平均值分别为 10.82%、18.18%、9.09%。从工程塑料性能单个预测误差来看,预测拉伸强度 5 年变化的 27 组数据中,有 8 组数据预测误差超过 15%,占比为 29.6%,正确率为 70.4%。预测延伸率 5 年变化的 23 组数据中,有 11 组数据预测误差超过 15%,占比为 47.8%,正确率为 52.2%。预测弯曲强度 5 年变化的 27 组数据中,有 5 组数据预测误差超过 15%,占比为 18.5%,正确率为 81.5%。可以看出,幂函数模型预测工程塑料单个力学性能的正确率从大到小依次为弯曲强度、拉伸强度、延伸率。

采用指数函数模型得出的 9 种工程塑料在 3 个自然环境试验站中,拉伸强度、延伸率、弯曲强度的预测值与实际值的相对误差平均值分别为 12.87%、20.39%、10.86%。从工程塑料性能单个预测误差来看,预测拉伸强度 5 年变化的 27 组数据中,有 11 组数据

表3 9种工程塑料弯曲强度的保留率预测

%

试验材料	试验环境	弯曲强度保留率								
		5年实际值	GM(1,1)模型		幂函数模型		指数函数模型		多项式模型	
			预测值	误差	预测值	误差	预测值	误差	预测值	误差
增强聚碳酸酯	江津站	94	90.67	-3.54	92.13	-1.98	89.02	-5.29	93.37	-0.66
	万宁站	89	88.80	-0.22	92.15	3.53	92.40	3.82	122.47	37.61
	碾子山站	94	95.36	1.44	98.24	4.51	98.98	5.29	97	3.19
聚碳酸酯	江津站	62	61.09	-1.46	73.20	18.07	71.99	16.11	43.81	-29.33
	万宁站	32	35.03	9.46	45.61	42.53	39.56	23.63	23.61	-26.20
	碾子山站	68	90.84	33.58	90.73	33.42	92.65	36.25	84.31	23.99
增强尼龙6	江津站	74	68.74	-7.10	71.76	-3.01	66.98	-9.48	73.98	-0.02
	万宁站	66	61.83	-6.31	64.82	-1.77	59.10	-10.45	70.8	7.27
	碾子山站	88	84.20	-4.31	88.11	0.12	88.82	0.93	76.98	-12.51
ABS	江津站	92	83.71	-9.01	90.67	-1.43	88.30	-4.01	85.6	-6.95
	万宁站	89	86.98	-2.27	91.79	3.13	92.02	3.39	83.59	-6.07
	碾子山站	97	94.97	-2.09	96.92	-0.07	99.59	2.67	97.58	0.60
聚砜	江津站	73	77.58	6.27	81.25	11.31	78.81	7.96	77	5.47
	万宁站	61	67.77	11.09	68.15	11.72	65.22	6.93	57.41	-5.88
	碾子山站	69	72.85	5.57	78.66	14.00	78.60	13.91	59.37	-13.95
聚甲醛(上海)	江津站	72	63.53	-11.76	66.93	-7.02	61.69	-14.31	68.4	-5.00
	万宁站	53	54.84	3.47	57.86	9.18	51.24	-3.31	65.19	23.00
	碾子山站	70	62.10	-11.28	65.55	-6.35	62.19	-11.15	65.02	-7.11
聚甲醛(西德)	江津站	67	61.15	-8.73	61.23	-8.60	54.73	-18.29	73.81	10.17
	万宁站	30	31.23	4.1	36.93	23.13	29.52	-1.57	38.8	29.33
	碾子山站	66	50.01	-24.22	54.68	-17.14	47.86	-27.48	58.52	-11.32
增强低压聚乙烯	江津站	49	43.75	-10.71	47.13	-3.79	38.38	-21.67	64.6	31.83
	万宁站	45	46.20	2.66	46.58	3.51	37.23	-17.26	67.82	50.71
	碾子山站	56	57.94	3.46	58.65	4.74	52.41	-6.41	70.2	25.35
增强低压聚乙烯(加助剂)	江津站	78	71.11	-8.83	73.72	-5.47	70.75	-9.29	70.98	-8.99
	万宁站	78	70.49	-9.62	75.06	-3.76	72.82	-6.63	72.98	-6.42
	碾子山站	90	126.22	40.24	91.89	2.10	95.12	5.69	92	2.22
预测误差平均值				8.99		9.09		10.86		14.49

预测误差超过15%，占比为40.7%，正确率为59.3%。预测延伸率5年变化的23组数据中，有13组数据预测误差超过15%，占比为56.5%，正确率为43.5%。预测弯曲强度5年变化发27组数据中，有6组数据预测误差超过15%，占比为22.2%，预测正确率为77.8%。可以看出，指数函数模型预测工程塑料单个力学性能的正确率从大到小依次为弯曲强度、拉伸强度、延伸率。

采用多项式模型得出的9种工程塑料在3个自然环境试验站中，拉伸强度、延伸率、弯曲强度的预测值与实际值的相对误差平均值分别为37.04%、77.99%、14.49%。除弯曲强度外，其他力学性能的预测误差在工程上是难以可以接受的。从工程塑料性能

单个预测误差来看，预测拉伸强度5年变化的27组数据中，有15组数据预测误差超过15%，占比为55.5%，正确率为44.5%。预测延伸率5年变化的23组数据中，有17组数据预测误差超过15%，占比为73.9%，正确率为26.1%。预测弯曲强度5年变化的27组数据中，有8组数据预测误差超过15%，占比为29.6%，预测正确率为70.4%。可以看出，多项式模型预测工程塑料单个力学性能的正确率从大到小依次为弯曲强度、拉伸强度、延伸率。

工程塑料力学性能预测模型预测正确率比较如图1所示。

从图1可以看出，从3种力学性能预测正确率来看，弯曲强度的预测正确率总体较拉伸强度、延伸率

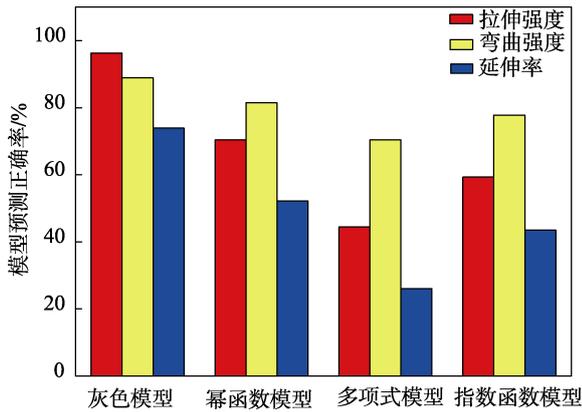


图 1 工程塑料力学性能预测正确率比较

高，延伸率的预测正确率最低。从 4 种模型预测正确率来看，GM(1,1)模型预测结果明显优于幂函数模型、指数函数模型、多项式模型。几种模型预测正确率从高到低依次为灰色模型、幂函数模型、指数函数模型、多项式模型。

工程塑料力学性能预测模型平均预测误差比较如图 2 所示。

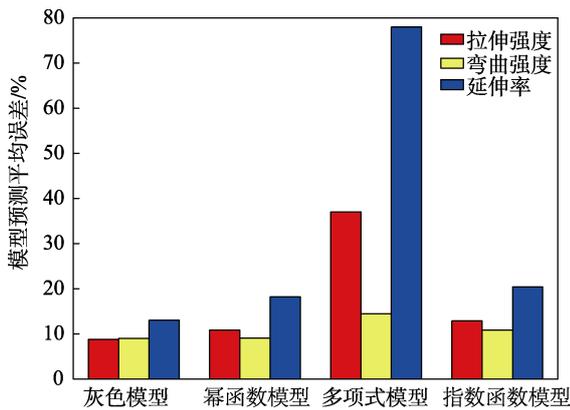
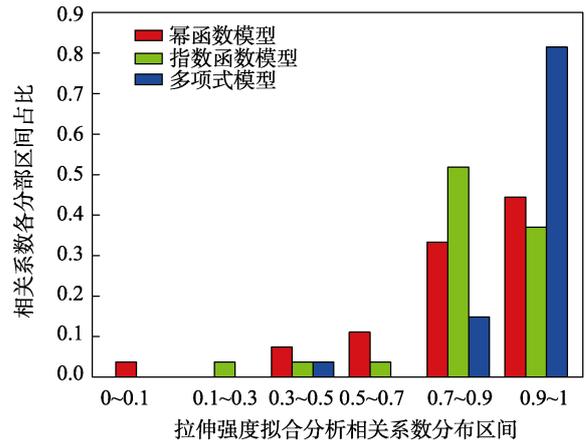


图 2 工程塑料力学性能平均预测误差比较

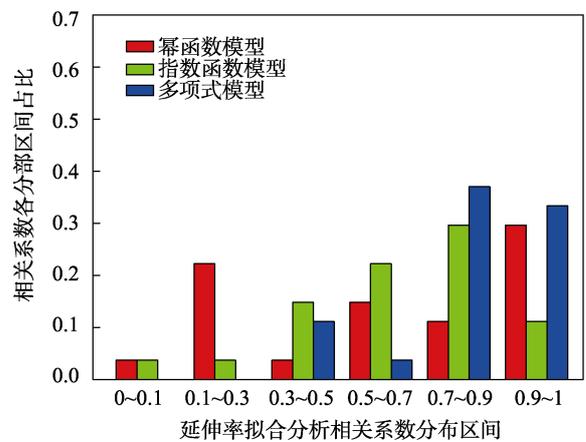
从图 2 可以看出，从 3 种力学性能平均预测误差来看，弯曲强度较拉伸强度、延伸率的平均预测误差低，延伸率的预测误差最大。从 4 种模型平均预测误差来看，GM(1,1)模型预测结果明显优于幂函数模型、指数函数模型、多项式模型，几种模型平均预测误差从低到高依次为灰色模型、幂函数模型、指数函数模型、多项式模型。从 4 种预测模型的预测正确率和平均预测误差来看，灰色模型在预测小样本数据方面具有较好的预测效果和较高的准确度，说明灰色 GM(1,1)模型在塑料老化问题预测研究方面具有重要应用价值。

工程塑料力学性能预测模型相关系数分布区间比较如图 3 所示。

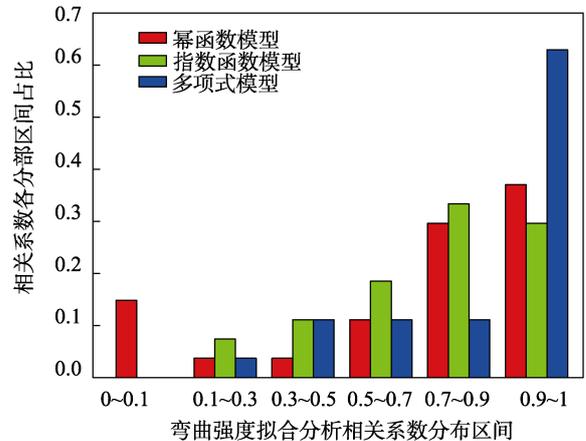
从图 3 可以看出，幂函数模型、多项式模型、指数函数模型等 3 种预测模型中，多项式模型的总体拟合效果最好，幂函数模型次之，指数函数模型最差。



a 拉伸强度



b 延伸率



c 弯曲强度

图 3 工程塑料力学性能预测模型相关系数比较

从模型预测正确率和平均预测误差来看，多项式模型的预测正确率最低，平均预测误差最大。说明了利用塑料环境效应数据进行性能预测时，常常会出现拟合效果非常好，但预测精度却不高的情况。出现此现象的主要原因在于，拟合效果好，只能说明预测模型对于训练数据的拟合误差较小，但是环境效应发生过程呈现随机性、非线性、多变性及突变性特点。再加上研究者掌握的塑料老化-时间数据的样本量很小，通过现有数据拟合得到的老化程度与试验时间的函数

关系如同盲人摸象,并不能一定可以反映塑料老化程度与试验时间关系的全貌。

此外,值得注意的是,在工程塑料的幂函数模型和指数函数模型预测时,出现了形如  $y=92.15x^{0.000}$ 、 $y=98.16e^{-0.00x}$ 、 $y=99.59e^{-0.00x}$  的拟合方程,且拟合方程预测工程塑料第5年力学性能值的误差均在5%以内。单纯从预测误差来看,拟合方程的预测正确率均很高。从拟合方程反映的工程塑料老化趋势来看,在试验暴露期间,工程塑料的拉伸强度或弯曲强度值保持为常数,即性能不发生变化,这与客观规律明显不符。

### 3 结论

1) 综合考虑塑料户外暴露期间力学性能数据变化特点,力学性能模型预测结果以及灰色 GM(1,1)模型、幂函数模型、指数函数模型、多项式模型本身的模型特征,灰色 GM(1,1)模型在预测小样本数据方面具有较好的预测效果和较高的正确率,即使在塑料力学性能数据具有一定波动性的情况下,仍能够保持较好的预测效果。幂函数模型、指数函数模型对于在整个试验周期内呈单调变化的力学性能预测正确率较高。多项式模型对于整个试验周期内波动变化的力学性能预测拟合效果较好,但预测正确率有待商榷。

2) 从拉伸强度、延伸率、弯曲强度3种塑料力学性能的预测正确率和平均预测误差来看,弯曲强度的预测效果最好,延伸率的预测效果最差。

3) 在挖掘分析塑料大气老化评价指标和试验时间之间的函数关系时,不仅要考虑预测模型的拟合效果好坏、相关系数高低、预测误差和预测正确率高低,还应注意预测模型反映出来的塑料性能变化规律是否符合客观实际,这样得到的预测模型才能最大程度上反映塑料老化程度与试验时间关系的全貌。

### 参考文献:

- [1] 宣卫芳,胥泽奇,肖敏,等. 装备与自然环境试验·基础篇[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- [2] 许明,张伦武. 武器装备环境适应性现状及分析[C]// 装备环境工程研讨会论文集. 北京: 总装备部电子信息基础部技术基础局,总装备部技术基础管理中心, 2004.
- [3] 文邦伟,胥泽奇. 外军装备环境适应性典型案例[J]. 装备环境工程, 2005, 2(3): 83-87.
- [4] 宣卫芳,胥泽奇,肖敏,等. 装备与自然环境试验·提高篇[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [5] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- [6] 陈奎,张天云,郑小平,等. 灰色理论在塑料老化行为预测中的应用研究[J]. 塑料工业, 2013, 41(4): 113-116.
- [7] 潘青飞,安中华,周勤. 玻璃纤维增强塑料老化的预测分析[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(5): 51-54.
- [8] 张天云,陈奎,胡玉霞,等. 残差灰色预测模型在塑料老化行为预测中的应用[J]. 现代化工, 2013, 33(5): 119-123.
- [9] 田峻山,俞奇勇,张帆. 塑料老化程度的优化变参数模型及预测[J]. 塑料工业, 2007, 35(7): 51-53.
- [10] 李晖,张录平,孙岩,等. 玻璃纤维增强复合材料的寿命预测[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(1): 68-73.
- [11] 黄伟,仇君. 塑料自然老化力学性能的灰色预测[J]. 广西大学学报, 2001, 26(4): 275-282.
- [12] 祁黎,王俊. 高分子材料服役寿命预测方法最新进展[J]. 环境技术, 2014, (5): 62-64.
- [13] 黄亚江,叶林,廖霞,等. 复杂条件下高分子材料老化规律、寿命预测与防治研究新进展[J]. 高分子通报, 2017, (10): 52-63.
- [14] 刘思峰,谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] DENG Ju-long. Introduction to Grey System Theory[J]. The Journal of Grey System, 1989, 1(1): 1-24.