

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.03.020

基于声发射信号的 PE 塑料失效 PCA 预测方法

李涛,李俊,张学非,史君林,陶静

(四川轻化工大学机械工程学院,四川自贡 643000)

摘要:以聚乙烯(PE)塑料为研究对象,采用声发射监测技术对不同拉伸速度下试样失效过程进行监测,采集相应的声发射信号(持续时间、幅值、事件计数、撞击次数等),通过相关性系数分析确定评价因子,利用三角形隶属函数确定各评语集的失效隶属度,建立了PE塑料失效破坏程度主成分分析(PCA)模糊预测评价模型。另取同型号PE试样进行不同速度拉伸损伤破坏试验,并对损伤过程“力-时间”曲线的弹性阶段、屈服阶段(轻微失效)、颈缩阶段(中度失效)、断裂阶段(严重失效)特征点参数进行统计,破坏过程中所选时间点对应的失效程度与PCA预测评价结果一致,验证了模糊预测评价模型的可行性。

关键词:聚乙烯塑料;声发射;失效;主成分分析(PCA)模糊预测

中图分类号: TQ320.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)03-0108-05

PCA Prediction Method of PE Plastic Failure based on Acoustic Emission Signals

Li Tao, Li Jun, Zhang Xuefei, Shi Junlin, Tao Jing

(College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: Polyethylene (PE) plastic was taken as the research object, and the acoustic emission monitoring technology was used to monitor the failure process of samples under different tensile speeds. The corresponding acoustic emission signals (duration, amplitude, event count, impact times, etc.) were collected, the evaluation factors were determined by the correlation coefficient analysis, and the failure membership degree of each comment set was determined by the triangular membership function, the principal component analysis (PCA) fuzzy prediction evaluation model of PE plastic failure degree was established. Another PE sample of the same type was used for tensile damage destruction test at different speeds, and the characteristic point parameters of the elastic phase, yield phase (slight failure), necking phase (moderate failure), and fracture phase (severe failure) were counted in the “force-time” curve of the damage process. The failure degree corresponding to the selected time point in the destruction process is consistent with the PCA prediction evaluation result, which verifies the feasibility of the fuzzy prediction evaluation model.

Keywords: polyethylene plastic; acoustic emission; failure; principal component analysis (PCA) fuzzy prediction

聚乙烯(PE)管作为一种绿色环保型塑料管材,以其优越的综合性能被广泛应用于城镇燃气输送、农业灌溉、工业流体运输等领域^[1-3]。塑料管道使用过程中,在力、光、热、水等因素的综合影响下常会发生失效破坏。因此,在役管道监测方法的探究和失效的预估与评价对于塑料管道的安全运行具有重要意义。

长期以来,众多学者对PE塑料失效破坏风险评估进行了相关研究。谢丽婉^[4]、郭岩宝等^[5]采用

风险矩阵法和建立管道故障树的方式进行风险评价。靳书斌等^[6]、张乃方^[7]采用Kent评分法和专家打分法提高管道可靠性。李明阳^[8]针对交通载荷作用下埋地PE燃气管道失效影响因素,将力学模拟与实验相结合,为PE管的安全评定和力学性能测试提供了参考。陈志磊^[9]、周敏^[10]通过试验对土体沉降和塌陷引起的埋地PE管道变形破坏进行模拟研究,其结果对PE管道在长时间荷载作用下的安全分析具有一定的参考价值。

基金项目:四川省高校重点实验室开放基金项目(GK201809, GK201607)

通信作者:李涛,硕士,助教,主要从事非金属承压设备安全技术研究工作 E-mail: Taoli_515@163.com

收稿日期: 2020-12-03

引用格式: 李涛,李俊,张学非,等. 基于声发射信号的PE塑料失效PCA预测方法[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(3): 108-112.

Li Tao, Li Jun, Zhang Xuefei, et al. PCA prediction method of PE plastic failure based on acoustic emission signals[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3): 108-112.

然而,塑料失效破坏过程是一个复杂的非线性过程,失效过程中变量众多,难以建立精确的数学模型进行失效程度预测^[11]。主成分分析(PCA)模糊预测方法是一种通过降维技术把多个变量化为少数几个主成分的统计分析方法。这些主成分能够反映原始变量的绝大部分信息,且各特征变量具有较好的鲁棒性,能对抗噪声或其它干扰^[12-13],有效提高 PE 塑料管道失效程度预测的可靠性。

笔者以模糊数学为基础,建立 PCA 模糊预测评价模型,结合声发射信号的特征参数,对 PE 塑料的拉伸失效情况进行模糊预测,从而为 PE 塑料管道失效程度评价和在役 PE 塑料管道监测方法的研究提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE: 牌号 2100TN00, 中国石油化工股份有限公司齐鲁分公司。

1.2 主要仪器与设备

注塑机: DRV4-55T 型, 深圳市德润机械有限公司;

微机控制电子万能试验机: CMT5504 型, 配套控制软件为 SANS Power-Test, 美特斯工业系统(中国)有限公司;

全信息声发射仪: DS5-16C 型, 北京软岛科技公司。

1.3 试样制备

参照 GB/T 1040-2006 和 ISO3167-2002, 通过注塑制作 25 根哑铃形 PE 拉伸试验试样, 注塑工艺采用 GB/T 9352-2008 标准要求。

1.4 拉伸试验方案

根据噪声实验结果, 对声发射系统参数进行设定, 开启微机控制电子万能试验机, 打开 SANA-Power Test-DOOC 软件, 按照实验方案对该软件进行设置。

利用试验机自带的夹具将试样固定在试验机上, 用标记笔在试样上画出布置传感器的位置, 再用胶带把声发射传感器固定在试样的布置位置。

按照要求设置好相关参数后, 同时开始拉伸加载和声发射监测信号采集, 对 PE 试样的拉伸损伤全过程进行实时监测。在拉伸试验过程中, 按照 70, 80, 90, 100, 110 mm/min 五种速度对 PE 试样进行拉伸, 每种拉伸速度下做五个相同试样的平行试验。

2 模糊预测模型建立

2.1 评价因子的确定

对比五种拉伸速度下 PE 拉伸损伤过程声发射信号, 可以发现声发射信号基本不受拉伸速度的影响, 以 70 mm/min 拉伸速度的数据为例进行分析。实验测得的 PE 拉伸损伤过程声发射信号特征参数有持续时间、事件计数、幅值、撞击次数以及能量。若要通过 PE 拉伸损伤过程声发射信号的特征来对塑料失效程度进行模糊预测, 首先需要评价塑料拉伸损伤过程声发射信号评价因子间的线性相关^[14-15]。采用 Corrccoef 函数对实验数据进行统计分析, 可得到各评价因子的相关性系数。根据相关性系数分析结果, 事件计数、幅值和撞击次数之间存在线性无关(见表 1), 而持续时间和能量存在一定相关性不能作为评价因子, 故评价因子确定为事件计数、幅值、撞击次数。

表 1 事件计数、幅值和撞击次数相关性系数分析结果

项 目	事件计数	幅值	撞击次数
事件计数	1.000 0	0	0
幅值	0	1.000 0	0
撞击次数	0	0	1.000 0

2.2 权重的确定

由 PCA 的基本原理可以看出, 同一个主成分可能叠加了不同评价指标间的重复信息, 这才使得各个主成分有差异较大的贡献率^[16]。根据 PCA 的原理, 对原始数据矩阵 Y 进行转置得到转置矩阵 Y^T , 然后标准化处理矩阵 Y^T , 避免指标量纲影响, 进而求解出各主成分方差贡献率以及累计贡献率 $\beta_{(k)}$ 。若 $\beta_{(k)} \geq 85\%$, 则确定为 k 个主成分。用新指标 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 表示主成分, 则:

$$\varepsilon_j = \beta_{1j}y_1 + \beta_{2j}y_2 + \dots + \beta_{nj}y_n \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

式(1)中 ε_j 表示各主成分权重。通过计算得出新样本的综合得分, 再对其进行归一化处理, 其结果便可作为原来的数据矩阵各指标的权重。针对实验所取得的大量实验数据, 对其进行归一化处理可得各评价因子(幅值、撞击次数、事件计数)的权重。

2.3 隶属度函数的确定

建立隶属度函数是模糊评价预测的一个关键步骤, 隶属度表示某一声发射信号属于某一损伤级别的程度。根据拉伸过程将声发射信号分为 3 个等级: 轻微失效(屈服阶段)、中度失效(缩颈阶段)和严重失效(断裂阶段)。

轻微失效阶段: 幅度、撞击次数和事件计数值分别为 20~32, 1~3 和 10~71; 中度失效阶段: 幅度、

撞击次数和事件计数值分别为 32~50, 3~6, 1~10; 严重失效阶段: 幅度、撞击次数和事件计数值分别为 >50, >6, >71。由于轻微失效阶段试样为拉伸屈服, 高分子链在拉伸过程中断裂或错位较为明显, 而在中度失效区, 试样拉伸变形较为平缓, 故轻微失效阶段事件计数数据比中度失效区域大, 在后期的严重失效阶段, 高分子链出现急剧的断裂, 事件计数又突然增加。

(1) 确定幅值的隶属度函数。

采用三角形隶属度函数, 设幅值的轻微失效、中度失效、严重失效的隶属度函数分别为 $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$, 则有:

$$f_1(x) = \begin{cases} 1, x \leq 20 \\ \frac{x-20}{32-20}, 20 < x \leq 32 \\ \frac{50-x}{50-32}, 32 < x < 50 \\ 0, x \geq 50 \end{cases}$$

$$f_2(x) = \begin{cases} 0, x \leq 20 \\ \frac{32-x}{32-20}, 20 < x \leq 32 \\ \frac{x-32}{50-32}, 32 < x \leq 50 \\ 0, x > 50 \end{cases}$$

$$f_3(x) = \begin{cases} 0, x \leq 50 \\ 1, x > 50 \end{cases}$$

(2) 确定撞击次数的隶属度函数。

设撞击次数的轻微失效、中度失效、严重失效的隶属度函数分别为 $g_1(x)$, $g_2(x)$, $g_3(x)$, 则有:

$$g_1(x) = \begin{cases} 1, x \leq 1 \\ \frac{x-1}{3-1}, 1 < x \leq 3 \\ \frac{6-x}{6-3}, 3 < x < 6 \\ 0, x \geq 6 \end{cases}$$

$$g_2(x) = \begin{cases} 0, x \leq 1 \\ \frac{3-x}{3-1}, 1 < x \leq 3 \\ \frac{x-3}{6-3}, 3 < x < 6 \\ 0, x \geq 6 \end{cases}$$

$$g_3(x) = \begin{cases} 0, x \leq 6 \\ 1, x > 6 \end{cases}$$

(3) 确定事件计数的隶属度函数。

设事件计数的轻微失效、中度失效、严重失效的隶属度函数分别为 $h_1(x)$, $h_2(x)$, $h_3(x)$, 则有:

$$h_1(x) = \begin{cases} 0, x \leq 1 \\ \frac{x-1}{10-1}, 1 < x \leq 10 \\ \frac{71-x}{71-10}, 10 < x < 71 \\ 0, x \geq 71 \end{cases}$$

$$h_2(x) = \begin{cases} 0, x < 1 \\ \frac{10-x}{10-1}, 1 \leq x < 10 \\ \frac{x-10}{71-10}, 10 \leq x < 71 \\ 0, x \geq 71 \end{cases}$$

$$h_3(x) = \begin{cases} 0, x \leq 71 \\ 1, x > 71 \end{cases}$$

3 模糊预测及验证

3.1 PE 塑料失效程度模糊预测评价

为了验证模糊预测模型的正确性, 进行了验证性的实验。在 70~110 mm/min 五种拉伸速度下, 做了 5 个 PE 试样的拉伸损伤实验 (编号分别为①, ②, ③, ④, ⑤, 每个编号对应一种拉伸速度), 并利用声发射仪实时监测拉伸损伤全过程, 提取拉伸全过程的声发射信号特征参数及力学特征参数。

(1) 建立因素集和评价集。

评价集 $X=(X_1, X_2, X_3)$ (轻微失效, 中度失效, 严重失效), 因素集 $U=(U_1, U_2, U_3)$ (幅值, 撞击次数, 事件计数)。

(2) 确定权重集。

权重 $A=(A_1, A_2, A_3)=(0.52, 0.33, 0.15)$ 。

(3) 建立评价矩阵和综合模糊评价。

根据隶属度函数确定各评价点失效程度的隶属度, 然后根据模糊综合评价模型 $B=A \cdot R$ (B 为评价向量, R 为相关系数矩阵), 计算各个评价点的综合失效评价矩阵。在评价向量的基础上, 即可对各个评价点的损伤程度进行综合模糊预测评价。

在 PE 试样拉伸损伤过程声发射信号特征参数历程图 (如图 1 所示) 中选取三个时间点记为点 1、点 2 和点 3, 统计三个点声发射信号幅值、撞击次数和事件计数特征参数, 统计结果见表 2。

根据统计的 PE 塑料试样各个损伤阶段声发射特征参数和三个时间点所统计的声发射特征参数情况, 代入隶属度函数求得 PE 试样①, ②, ③, ④, ⑤各时间点的失效隶属度, 以 PE 试样③在点 1 的隶属度计算为例 (其它试样隶属度计算方式与试样③相同), 其计算结果见表 3。

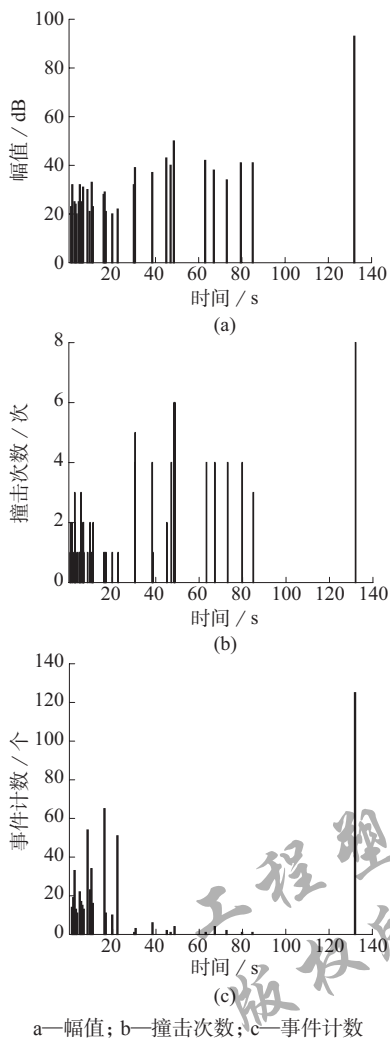


图1 PE 试样③拉伸损伤过程的声发射信号特征参数历程图

表2 PE 试样的拉伸损伤过程声发射信号特征参数

试样编号	时间点	幅值/dB	撞击次数/次	事件计数/个
①	点1 (13.0 s)	28	1	14
	点2 (47.0 s)	49	4	5
	点3 (144.5 s)	93	20	112
②	点1 (21.0 s)	29	1	15
	点2 (166.0 s)	45	5	6
	点3 (214.5 s)	93	10	138
③	点1 (6.0 s)	30	2	16
	点2 (47.5 s)	46	4	5
	点3 (131.0 s)	90	12	130
④	点1 (11.5 s)	28	1	14
	点2 (68.0 s)	47	5	3
	点3 (108.0 s)	92	12	122
⑤	点1 (8.5 s)	28	1	19
	点2 (45.0 s)	46	5	1
	点3 (74.5 s)	93	11	126

表3 PE 试样③在点1的失效隶属度

失效评价	幅值	撞击次数	事件计数
轻微失效	0.83	0.5	0.9
中度失效	0.17	0.5	0.1
严重失效	0	0	0

根据表3, PE 试样点1的评价向量计算如下:

$$B_1=A \cdot R_1=$$
$$[0.52 \ 0.33 \ 0.15] \cdot \begin{bmatrix} 0.83 & 0.17 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 \end{bmatrix} = [0.73 \ 0.27 \ 0]$$

向量中数据分别对应 PE 塑料的轻微失效、中度失效、严重失效,可以评价点1的失效程度;同理点2、点3评价向量 $B_2=[0.4 \ 0.6 \ 0]$, $B_3=[0 \ 0 \ 1]$,可以评价点2、点3失效程度。PE 试样①,②,④,⑤中也可以评价各点的失效程度。

(4) 评价结果。

PE 试样③中:点1的综合评价向量为 $[0.73 \ 0.27 \ 0]$,按照最大隶属原则,点1为轻微失效;点2的综合评价向量为 $[0.4 \ 0.6 \ 0]$,点2为中度失效;点3的综合评价向量为 $[0 \ 0 \ 1]$,点3为严重失效。

3.2 评价结果验证

另取同型号 PE 试样采用与上述试样③相同的拉伸试验条件进行验证,所得的力-时间曲线如图2所示,验证试样的特征点参数见表4。

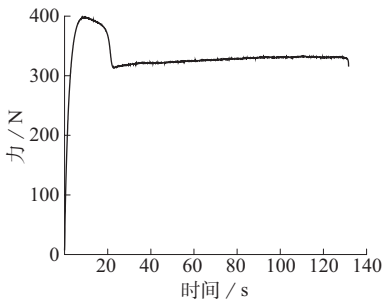


图2 PE 验证试样拉伸损伤过程力-时间曲线

表4 PE 验证试样各个特征点参数

项 目		力/N	时间/s
弹性阶段	起点	32.517	0.125
	终点	68.656	0.281
屈服阶段 (轻微失效)	起点	68.656	0.281
	终点	313.444	22.714
缩颈阶段 (中度失效)	起点	313.444	22.714
	终点	328.681	130.797
断裂阶段 (严重失效)	起点	328.681	130.797
	终点	316.487	131.681

由表4可知, PE 验证试样在点1处于轻微失效阶段,点2处于中度失效阶段,点3处于严重失效阶段,验证了模糊预测评价的正确性。对于其它拉伸速度下验证试样,根据拉伸损伤过程试验特征点参数进行验证后也证明了模糊预测评价的正确性。

4 结论

在五种不同拉伸速度下,通过万能试验机对 PE

塑料试样进行拉伸破坏实验,并对拉伸损伤过程中的声发射信号进行采集和分析,建立了基于声发射信号的PE塑料失效破坏程度PCA模糊预测评价模型,根据对PE试样拉伸损伤过程力-时间曲线的特征点参数进行统计,进行验证,证明了模糊预测评价模型的正确性。具体结论如下:①验证后的评价结果和模糊评价结果相符,证明可以用模糊预测评价方法来预测PE塑料失效程度;②通过建立PE拉伸失效过程中声发射信号与力学曲线特征参数之间的联系,实现了较精确的综合模糊评价,表明声发射监测方法不仅在金属方面适用,在监测塑料失效方面也同样可靠;③通过对试样中所取的任意时间点进行失效程度判断,为埋地油气PE塑料管道在线监测提供了一种方法。

参考文献

- [1] 肖燕,贾晓辉. 聚乙烯管道的电熔焊接[J]. 新型建筑材料,2007,34(4):15-17.
Xiao Yan, Jia Xiaohui. Electric fusion welding of pe pipeline[J]. New Building Materials,2007,34(4):15-17.
- [2] 林少全,吴春晖. 美国塑料管道发展之道[J]. 国外塑料,2006(9):22-25.
Lin Shaoquan, Wu Chunhui. Development of plastics pipes in america[J]. World Plastics,2006(9):22-25.
- [3] 王占杰,赵艳,郭晶. 中国塑料行业“十二·五”期间发展状况及“十三·五”期间发展建议[J]. 中国塑料,2016,30(5):1-7.
Wang Zhanjie, Zhao Yan, Guo Jing. Overview of China plastic pipe industry during the Twelfth-five Year and its development trends during the Thirteenth-five Year[J]. China Plastics,2016,30(5):1-7.
- [4] 谢丽婉. 基于模糊综合评价的聚乙烯(PE)管道安全预警程序[J]. 压力容器,2012,29(2):67-71.
Xie Liwan, Safety early warning procedure for polyethylene (PE) pipeline based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Pressure Vessel Technology,2012,29(2):67-71.
- [5] 郭岩宝,傅晓娟,孟涛,等. 基于权变-灰色理论的城镇燃气PE管道风险评价[J]. 压力容器,2015,32(3):59-65.
Guo Yanbao, Fu Xiaojuan, Meng Tao, et al. Risk assessment of city-gas PE pipeline based on variable weights and grey theory[J]. Pressure Vessel Technology,2015,32(3):59-65.
- [6] 靳书斌,侯磊,杨玉峰,等. 基于Kent法的PE燃气管道风险评价指标体系[J]. 煤气与热力,2014,34(3):88-91.
Jin Shubin, Hou Lei, Yang Yufeng, et al. Risk assessment index system of PE gas pipeline based on Kent method[J]. Gas & Heat,2014,34(3):88-91.
- [7] 张乃方. 城市燃气管网的风险评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [8] 李明阳. 埋地PE燃气管道失效机理的力学研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
Li Mingyang. Mechanics study on the failure mechanism of the buried polyethylene gas pipelines[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2010.
- [9] 陈志磊. 地基沉降引起地下PE管道变形破坏的试验与分析[D]. 太原:太原理工大学,2013.
Chen Zhilei. Experimental research and analysis of the pipeline deformation mechanism caused by subsoil settlement[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2013.
- [10] 周敏. 土体沉降和塌陷引起地下管道变形破坏的试验模拟研究[D]. 太原:太原理工大学,2013.
Zhou Min. Experimental study on the deformation and damage of underground pipeline caused by the settlement and collapse of soil[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2013.
- [11] Jones D, Dawson J. Risk assessment approach to pipeline life management[J]. Pipes and Pipelines International,1998,43(1):5-18.
- [12] 王楚正,谭晓风,陈延伟,等. 基于PCA和BP神经网络的O-糖基化位点的预测和模式分析[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(9):61-64.
Wang Chuzheng, Tan Xiaofeng, Chen Yanwei, et al. Pattern analysis and prediction of O-linked glycosylation sites in protein based on PCA and BP neural networks[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2010,30(9):61-64.
- [13] 张颖. 基于PCA的模糊BP网络建模方法在藻类生长状态预测中的应用[J]. 上海海事大学学报,2011,32(4):76-79.
Zhang Ying. Application of fuzzy BP network modeling method based prediction of algae growth on PCA in state[J]. Journal of Shanghai Maritime University,2011,32(4):76-79.
- [14] 齐云,许金凯,于占江,等. 高速微铣削稳定性的声发射监测[J]. 制造业自动化,2017(11):11-14,21.
Qi Yun, Xu Jinkai, Yu Zhanjiang, et al. Acoustic emission monitoring of high-speed micro-milling stability[J]. Manufacturing Automation,2017(11):11-14,21.
- [15] 陈刚,李培宁,陈学友,等. 压力容器与压力管道完整性技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
Chen Gang, Li Peining, Chen Xueyou, et al. Integrality technology for pressure vessel and pressure pipeline[M]. Beijing:China Machine Press,2005.
- [16] 颜惠琴,牛万红,韩惠丽. 基于主成分分析构建指标权重的客观赋权法[J]. 济南大学学报:自然科学版,2017,31(6):519-523.
Yan Huiqin, Niu Wanhong, Han Huili. Objective weight method based principal component analysis to establish on index weight[J]. Journal of University of Jinan:Science and Technology,2017,31(6):519-523.