

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.09.019

PE 拉伸失效破坏过程声发射信号分析及失效前兆预测

李俊¹, 唐万文¹, 张学非¹, 毛丹², 殷鹰²

(1. 四川理工学院机械工程学院, 四川自贡 643000; 2. 四川省特种设备检验研究院, 成都 610061)

摘要: 为了实时监测聚乙烯 (PE) 拉伸失效破坏过程声发射信号, 在 5 种不同拉伸速度下对 PE 材料进行恒速拉伸破坏实验, 首先在时域下对拉伸破坏过程各阶段的声发射信号特征参数变化规律进行了分析, 然后应用频谱分析方法对 PE 材料拉伸失效破坏过程声发射信号的频谱规律进行了研究。结果表明, PE 材料在拉伸失效破坏过程中, 弹性阶段不产生声发射信号, 屈服阶段声发射信号主频范围为 62~64 kHz, 颈缩阶段主频范围为 110~130 kHz, 断裂阶段主频范围为 20~30 kHz, 且这些主频范围不受拉伸速度大小的影响。最后在此基础上建立了基于声发射信号频谱分析的 PE 塑料失效前兆预测方法并进行了验证, 验证结果表明基于声发射信号频谱分析的 PE 塑料失效前兆预测是可行的。

关键词: 聚乙烯; 失效; 声发射; 监测; 预测

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)09-0106-06

Acoustic Emission Signal Analysis for Tensile Failure Process of PE and Prediction of Failure Precursor

Li Jun¹, Tang Wanwen¹, Zhang Xuefei¹, Mao Dan², Yin Ying²

(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China;

2. Sichuan Special Equipment Inspection Institute, Chengdu 610061, China)

Abstract: In order to monitor the acoustic emission signals of polyethylene (PE) tensile failure in real time, constant tensile failure experiments were carried out on PE materials at five different tensile speeds. Firstly, the variation of the characteristic parameters of acoustic emission signal in each stage of tensile failure was analyzed in time domain. Then the spectral law of the acoustic emission signal during the tensile failure process of PE material was investigated. The results show that, during the tensile failure process of the PE material, no obvious acoustic emission signals are produced in the elastic stage of the PE material, the main frequency ranges of the acoustic emission signals in different phases are 62-64 kHz in yield phase, 110-130 kHz in neck reduction phase, and 20-30 kHz in the fracture phase, respectively, and these frequency ranges are not affected by the tensile speed. Finally, a prediction method for failure precursor of PE plastics based on spectrum analysis of acoustic emission signal is established and verified, the verification results show that the method of predicting the failure precursor of PE plastics based on spectrum analysis of acoustic emission signal is feasible.

Keywords: polyethylene; failure; acoustic emission; monitoring; prediction

聚乙烯 (PE) 管作为一种绿色环保型塑料管材具有质轻价廉、耐腐蚀性、经济环保、使用寿命长等优点, 综合性能优越, 在我国中低压燃气管网得到广泛应用^[1]。虽然 PE 管道作为燃气管道优点众多, 但其强度、刚度和硬度较差, 设计缺陷、施工缺陷、焊接缺陷等隐患无处不在, 因而导致的事故也层出不

穷^[2]。PE 燃气管道属于特种设备之一, 直接关系到人民群众生命财产安全和社会经济运行安全^[3]。全国质检总局发布报告, 2017 年全国发生特种设备事故和相关事故 238 起, 死亡 251 人^[4]。

与传统无损检测相比较, 声发射技术在检测非金属材料时具有信号主动性、被检测工件几何形状

基金项目: 国家质检总局科研项目 (2017QK121), 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室项目 (GK201706)

通讯作者: 李俊, 博士, 教授, 主要从事系统安全可靠保障与智能化技术研究 E-mail: zg_junli@sina.com

收稿日期: 2018-07-10

引用格式: 李俊, 唐万文, 张学非, 等. PE 拉伸失效破坏过程声发射信号分析及失效前兆预测 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(9):106-111.

Li Jun, Tang Wanwen, Zhang Xuefei, et al. Acoustic emission signal analysis for tensile failure process of PE and prediction of failure precursor[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(9):106-111.

不敏感性、检测及时性和分析结果特征性等优点^[5]。近些年来,众多专家使用声发射技术对非金属材料展开相关研究。李伟等^[6]用声发射技术在线监测纤维增强复合材料 (FRP) 容器的损伤实验,对噪声信号进行小波变换过滤,对不同损伤机制下的声发射信号进行时频分析,结果表明可以区分出不同的损伤破坏;邬冠华等^[7]应用声发射技术对蜂窝夹层复合材料压缩损伤过程进行了试验研究,发现复合材料压缩损伤破坏与声发射的幅值、能量、撞击、上升时间、持续时间和计数等参量特征相关;李伟等^[8]通过 FRP 复合材料容器水压爆破过程的力学性能试验研究,结合声发射技术,研究 FRP 复合材料容器在受压损伤及爆破过程中的声发射信号变化规律;马济美^[9]研究 FRP 材料容器损伤声发射特性时,建立了属于复合材料容器安全性的评价方法。

目前针对非金属材料的声发射研究文献很多,充分验证了声发射监测在非金属材料方面的可靠性,但关于 PE 燃气管材料的声发射研究还比较少。针对目前我国埋地 PE 燃气管道不易开挖,事故发生造成损失严重的特点,若能知悉 PE 材料失效时的声发射信号特点,可在较低成本下快速进行 PE 材料失效前兆预测工作,从而使相关部门及时掌握 PE 的失效过程,从而避免相关事故的发生。PE 燃气管道主要有第三方挖掘失效、设计/施工/材料缺陷失效和老化失效等失效形式^[10]。笔者不考虑第三方挖掘失效的情况,主要考虑后两类失效情况,而气体或流体在 PE 管内传输过程中,管道内部压强大于外部压强,管道无论周向还是轴向均受到拉伸作用。因此通过分析 PE 材料受力拉伸过程中失效破坏的声发射信号特征参数及其变化规律,达到实现根据声发射信号前兆特征对失效程度进行预测的目的。

1 实验部分

1.1 原材料

线型低密度 PE (PE-LLD): 7144, 中石化广州石化分公司。

1.2 仪器与设备

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;

双通道声发射测试系统: PCI-2 型, 配套软件 AEwin, 美国物理声学公司 (PAC)。

1.3 试样制备

根据 GB / 1040—2006 和 ISO3167—2002, 委托湖北顾帝科技有限公司将 PE 材料注塑成标准拉伸试样。注塑的拉伸试样具体形状如图 1 所示, 主要尺寸参数如表 1 所示。

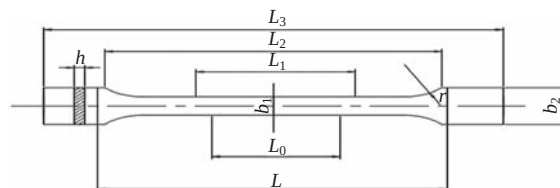


图 1 注塑拉伸试样示意图

表 1 注塑拉伸试样主要尺寸参数

参数名称	参数值	mm
总长度 L_3	150	
窄部平均长度 L_1	60.0 ± 0.5	
半径 r	≥ 60	
宽平行部分的距离 L_2	106~120	
端部宽度 b_2	20.0 ± 0.2	
窄部宽度 b_1	10.0 ± 0.2	
夹具间的初始距离 L	110	
标距 L_0	50.0 ± 0.5	
优选厚度 h	4.0 ± 0.2	

1.4 声发射下的拉伸实验方案

在电子万能试验机上固定实验试样和传感器, 按照要求设置好相关试验仪器的实验参数, 同时开始进行拉伸加载实验以及声发射监测信号的采集, 直到试样拉伸断裂结束为止, 对试样拉伸损伤全过程进行实时监测, 利用 MATLAB 软件对收集到的声发射信号进行频谱分析。实验中按照 70, 80, 90, 100, 110 mm/min 的速度对 PE 试样进行恒速拉伸, 每种拉伸速度下做 5 个相同试样的平行实验。

1.5 实验环境噪声频谱分析

在拉伸 PE 试样前进行空拉, 测定环境噪声频率在 10 kHz 以下的低频信号, 拉伸实验过程中声发射信号采用带通滤波, 通带左边界 20 kHz, 通带右边界 140 kHz, 阻带左边界 10 kHz, 阻带右边界 160 kHz。

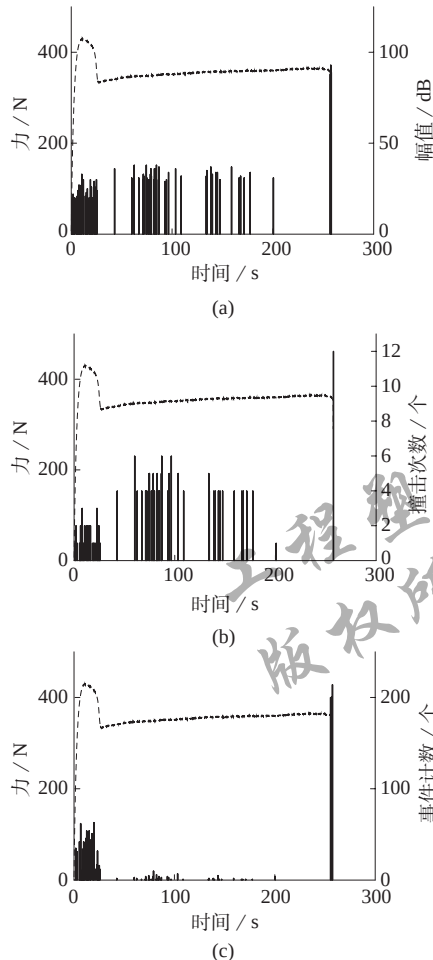
2 结果与讨论

2.1 实验结果分析流程

利用拉伸过程中声发射仪得到的相关参数, 对拉伸过程中的声发射信号进行参数化分析, 采用主成分分析方法^[11]发现得到的幅值、撞击次数和事件计数之间线性无关, 故这里通过以上 3 个参数对实验结果进行分析, 这 3 个参数的定义和用途见表 2。图 2 为声发射信号参数示意图 (图中虚线为拉伸实验中的拉伸力-时间曲线)。根据力学拉伸曲线,

表2 声发射信号参数

参数	含义	特点与用途
事件计数	由一个或几个撞击鉴别所得声发射时间的个数	反应声发射事件的总量和频度,用于源的活动性和定位集中度评价
幅值	事件信号波形的最大振幅值	常用于波源的类型鉴别,强度及衰减的测量
撞击和撞击计数	撞击是通过门槛并导致一个系统通道累计数据的任一声发射信号,撞击计数则是系统对撞击的累计计数	反应声发射活动的总量和频度,常用于声发射活动性评价



a—声发射信号幅值图; b—声发射信号撞击次数图;
c—声发射信号事件计数图

图2 声发射信号参数示意图

结合声发射信号特征参数的变化规律,深层次地研究声发射波形的特性,进一步加深对PE拉伸失效破坏过程的认识,为后阶段的声发射信号频谱分析

打下基础。

2.2 声发射信号特征参数分析

选择拉伸速度为70 mm/min时的声发射信号参数进行分析,其它拉伸速度下的参数分析过程均相同。

(1) 幅值分析。

表3为70 mm/min速度下PE拉伸过程的声发射信号幅值参数。表3显示,在同一拉伸速度下,弹性阶段材料产生可以恢复的形变,不会形成声发射信号幅值;在屈服阶段,材料中垂直于拉伸方向或与拉伸方向成一定角度的微晶会因为链段的活动而遭破坏,产生的声发射信号幅值比较密集,幅值范围为20~32 dB;在颈缩阶段,重排的大分子及其链段由于会沿着拉伸方向高度平行地排列,因而分子间作用力和规整性都相应增加,又重新形成沿着拉伸方向取向的稳定微晶,产生了比弹性和屈服阶段幅值更高的声发射信号,幅值范围为32~50 dB;在断裂阶段,PE材料被拉断,产生的声发射信号幅值最大,阶段时间较短,产生的声发射信号幅值比较密集,应力波幅值范围基本在90 dB以上。

同一拉伸速度下,屈服阶段、颈缩阶段和断裂阶段的声发射信号具有明显的差异。总体上,从拉伸的屈服阶段到断裂阶段,声发射信号幅值呈上升趋势,幅值密度呈先下降后上升趋势。由此可见,PE材料在拉伸的各个阶段会产生不同的声发射信号幅值。

另外,通过不同拉伸速度下的拉伸实验可以发现,随着拉伸速度的增加,各个拉伸阶段的声发射信号幅值大小范围无明显变化。

(2) 撞击次数分析。

表4为70 mm/min速度下PE拉伸过程的声发射信号撞击次数统计。表4显示,在同一拉伸速度下,弹性阶段PE材料发生弹性形变,不产生声发射撞击信号;在屈服阶段,因为非晶区的大分子链段失效而出现局部熔融或晶面滑移现象,PE材料产生了1~4次声发射信号撞击,声发射信号撞击次数

表3 70 mm/min速度下PE拉伸过程的声发射信号幅值参数表

测试次数	拉伸弹性阶段		拉伸屈服阶段		拉伸颈缩阶段		拉伸断裂阶段	
	幅值范围/dB	幅值密度/(次·s ⁻¹)	幅值范围/dB	幅值密度/(次·s ⁻¹)	幅值范围/dB	幅值密度/(次·s ⁻¹)	幅值范围/dB	幅值密度/(次·s ⁻¹)
第1次	[0]	0	[20,32]	1.000	[33,53]	0.192	[92]	0.429
第2次	[0]	0	[20,31]	0.929	[32,50]	0.033	[91,93]	2.000
第3次	[0]	0	[20,32]	0.704	[33,50]	0.108	[93]	2.000
第4次	[0]	0	[20,32]	0.857	[32,50]	0.077	[92]	0.200
第5次	[0]	0	[20,32]	1.000	[32,50]	0.172	[88,93]	0.429

表 4 70 mm/min 速度下 PE 拉伸过程的声发射信号撞击次数统计表

测试次数	拉伸弹性阶段		拉伸屈服阶段		拉伸颈缩阶段		拉伸断裂阶段	
	撞击次数 / 个	撞击次数密度 / (个·s ⁻¹)	撞击次数 / 个	撞击次数密度 / (个·s ⁻¹)	撞击次数 / 个	撞击次数密度 / (个·s ⁻¹)	撞击次数 / 个	撞击次数密度 / (个·s ⁻¹)
第 1 次	0	0	[1,3]	1.474	[4,6]	0.155	[10,12]	0.222
第 2 次	0	0	[1,4]	1.286	[3,6]	0.066	[11,12]	0.600
第 3 次	0	0	[1,3]	0.821	[3,6]	0.030	[10,12]	1.500
第 4 次	0	0	[1,3]	1.280	[4,6]	0.208	[11,12]	0.429
第 5 次	0	0	[1,2]	0.649	[3,6]	0.148	[12]	0.600

密度较大;在颈缩阶段,PE 材料内部的大分子和链段经过重排,重新形成稳定微晶和增强的分子间作用力,产生了 3~6 次声发射信号撞击;断裂阶段由于材料完全断裂,PE 材料产生了近 12 次声发射撞击,阶段时间较短,声发射信号撞击次数密度较大。在整个拉伸阶段,各个拉伸阶段的声发射撞击次数具有明显的差异,从屈服阶段到断裂阶段的声发射信号撞击次数呈上升趋势,声发射信号撞击次数密集度呈先减小后增大趋势。

不同拉伸速度的拉伸实验表明,随着拉伸速度的变化,各个阶段声发射信号撞击次数范围无明显的波动。

(3) 事件计数分析。

表 5 为 70 mm/min 速度下 PE 拉伸过程的声

发射信号事件计数统计。表 5 显示,在同一拉伸速度下,弹性阶段 PE 材料发生弹性形变,没有声发射事件的产生;在屈服阶段,PE 材料产生声发射事件,声发射事件计数范围在 10~71 个,产生的声发射事件密度较大;在颈缩阶段,因为 PE 材料内部的分子间作用力以及微晶的失效,产生声发射事件,声发射事件计数范围在 1~10 个,产生的声发射事件密度较小;在断裂阶段,PE 材料完全断裂,产生的事件计数超过 210 个,产生的声发射事件密度较大。在整个拉伸阶段,声发射事件计数和密度均呈先减小后增大的趋势。

不同拉伸速度的拉伸实验表明,随着拉伸速度的变化,各个拉伸阶段的声发射信号事件计数范围无明显变化。

表 5 70 mm/min 速度下 PE 拉伸过程的声发射信号事件计数统计表

测试次数	拉伸弹性阶段		拉伸屈服阶段		拉伸颈缩阶段		拉伸断裂阶段	
	事件计数 / 个	事件计数密度 / (个·s ⁻¹)	事件计数 / 个	事件计数密度 / (个·s ⁻¹)	事件计数 / 个	事件计数密度 / (个·s ⁻¹)	事件计数 / 个	事件计数密度 / (个·s ⁻¹)
试样 1	0	0	[11,71]	0.704	[1,9]	0.113	[210,214]	0.400
试样 2	0	0	[10,71]	0.960	[1,10]	0.208	[211,217]	0.429
试样 3	0	0	[11,72]	1.130	[1,10]	0.103	[211]	0.500
试样 4	0	0	[10,71]	0.857	[1,10]	0.0659	[211,214]	0.600
试样 5	0	0	[11,71]	0.842	[1,10]	0.138	[216]	0.333

2.3 声发射频谱分析

采用快速傅里叶变换^[12-13]方法,在 MATLAB 系统下,将时域下得到塑料拉伸失效破坏过程的声发射原始信号进行傅里叶变化,将信号从时域变换到频域,进而对不同情况下的频谱特点及其规律进行分析,获得对应信号的频率成分及各个成分分量的大小,在此基础上进行失效破坏前兆预测。图 3 为不同拉伸速度下的 PE 材料声发射信号主频图。由图 3 可以发现以下现象。

(1) PE 材料内部的晶体存在着位错缺陷,屈服阶段晶体位错处于较低能态,加上非晶区的大分子链段的失效,最终使屈服阶段声发射主频在 62~64 kHz 范围内,平均主频 62.87 kHz。随着拉伸速度的变化,PE 材料声发射信号主频率相对平均主频的变化率为 -0.26%~0.34%。

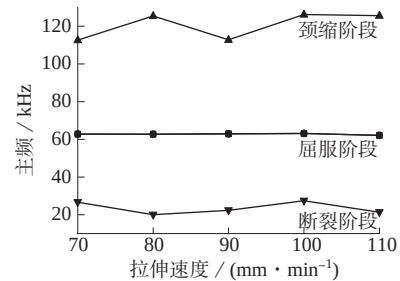


图 3 不同拉伸速度下的 PE 材料声发射信号主频图

(2) 颈缩阶段位错滑移处于高能态,而且分子及其链段经过重排,重新形成稳定微晶,故颈缩阶段声发射主频较高,为 110~130 kHz,平均主频 120.56 kHz。随着拉伸速度的变化,PE 材料声发射信号主频率相对平均主频的变化率为 -6.6%~4.7%。

(3) 断裂阶段本身时间比较短,该阶段声发射主频为 20~30 kHz,平均主频 23.59 kHz。随着拉伸

速度的变化,PE材料声发射信号主频率相对平均主频的变化率为-15.2%~16.3%。

(4) 在PE材料拉伸失效破坏过程中,颈缩阶段声发射信号主频最高,屈服阶段次之,断裂阶段最小。

(5) 通过对比各个阶段主频率相对平均主频的变化率的数值,拉伸失效速度的变化不会引起各个阶段的主频发生明显变化。

3 失效预测与验证

3.1 前兆预测

根据上述PE材料声发射频谱规律分析,在PE材料拉伸失效破坏过程中,颈缩阶段声发射信号主频最高,范围为110~130 kHz;屈服阶段声发射信号主频次之,范围为62~64 kHz;断裂阶段声发射信号主频最小,范围为20~30 kHz,该规律不受拉伸破坏速度大小的影响。

基于这一规律,提出了如下所示的基于频谱分析的PE燃气管材料拉伸失效前兆预测方法。

(1) 在PE材料服役过程中,一旦监测到声发射信号,即材料开始有损伤。

(2) 对监测到的PE材料失效过程声发射数据进行频谱分析,并根据主频特点按如下方法进行归类,从而评判失效程度并发出相应级别预警:

①当主频在62~64 kHz范围内时,则PE材料已进入屈服失效阶段,需要发出预警,并对相关设备进行评估;

②当主频在110~130 kHz范围内时,则PE材料已进入缩颈阶段,需要发出较高级别的预警信号,并尽快更换相关设备;

③当主频在20~30 kHz范围内时,则PE燃气管正处于断裂阶段,需要发出最高级别的预警,甚至人员疏散。

3.2 实验验证

为了对上述前兆预测方法进行验证性实验,任意选取4个PE试样,分别在70~100 mm/min的拉伸速度下进行实验,同时用声发射仪器进行监测。之后在拉伸实验过程的开始阶段随机抽取两段声发射信号、在中间阶段和结束阶段各随机抽取1段声发射信号,对其进行频谱分析,根据统计的各PE试样各抽样段的主频情况和预测结果,对比该抽样段在PE拉伸应力-应变曲线上所处的阶段,判断两者是否符合,从而验证前兆预测方法的准确性。

4个PE试样抽样段主频及预测和对比结果如表6所示。

表6 4个PE试样抽样段主频及预测和对比结果

项 目	抽样段主频 / kHz	预测结果	对比结果 ¹⁾
试样 1	62.01	屈服阶段	✓
	62.01	屈服阶段	✓
	129.6	颈缩阶段	✓
	27.01	断裂阶段	✓
试样 2	62.37	屈服阶段	✓
	62.36	屈服阶段	✓
	129.4	颈缩阶段	✓
	25.45	断裂阶段	✓
试样 3	62.12	屈服阶段	✓
	62.11	屈服阶段	✓
	129.7	颈缩阶段	✓
	22.13	断裂阶段	✓
试样 4	63.08	屈服阶段	✓
	63.09	屈服阶段	✓
	125.7	颈缩阶段	✓
	26.96	断裂阶段	✓

注:1) 对比结果是指预测结果给出的该抽样段下试样所处的阶段是否与该抽样段在试样拉伸应力-应变曲线上所处的阶段一致,若一致,则以✓表示,若不一致,则以×表示。

实验验证结果表明,PE各试样在整个拉伸破坏过程中,根据对抽样段声发射信号的频谱分析,按照失效前兆预测方法,能够分辨出对应信号所处的阶段,对比该点在PE拉伸应力-应变曲线上所处的阶段,两者完全对应,验证了PE材料拉伸失效破坏前兆预测方法的准确性。

4 结论

(1) 在PE材料拉伸失效破坏过程中,屈服、颈缩和断裂各阶段声发射信号的主要特征参数(信号幅值、撞击次数、时间计数)具有明显的差异,对于同一失效过程来看,声发射信号幅值和撞击次数从屈服阶段到断裂阶段呈增大趋势,声发射事件计数呈现先减小后显著增大的变化规律。

(2) 拉伸速度对PE材料各个拉伸阶段的声发射信号幅值、事件计数以及撞击次数等主要参数的波动范围没有明显影响。

(3) 在PE材料拉伸失效破坏过程中,弹性阶段不产生声发射信号,颈缩阶段声发射信号主频最高,范围为110~130 kHz,屈服阶段主频范围为62~64 kHz,断裂阶段最小,主频范围为20~30 kHz,该规律很稳定,且不受拉伸速度大小的影响。

(4) 通过对PE材料拉伸失效前兆进行实验验证表明,根据分析声发射信号主频范围来预测PE材料失效过程的方法可靠性高,对于埋地PE燃气管道安全监测具有很强实用性。

参考文献

- [1] Ahmad S, Mohammed H, Shah J, et al. The influence of ziegler-natta and metallocene catalysts on polyolefin structure properties and

- processing ability[J]. Materials, 2014, 7(7):5 069–5 108.
- [2] 孟晓丽,郭岩宝,孟涛,等. 燃气 PE 管道安全状况等级评定初探[J]. 压力容器, 2017, 34(5):53–54.
- Meng Xiaoli, Guo Yanbao, Meng Tao, et al. First exploration on class of safety condition for gas PE pipeline[J]. Pressure Vessel Technology, 2017, 34(5):53–54.
- [3] 李茂东,吴文东,涂欣,等. 聚乙烯燃气管道安全质量控制与城市公共安全[J]. 化工设备与管道, 2013, 50(4):67–68.
- Li Maodong, Wu Wendong, Tu Xin, et al. Safety and quality control of polyethylene gas piping and public safety in city[J]. Process Equipment & Piping, 2013, 50(4):67–68.
- [4] 徐成,徐平,施建峰,等. 聚乙烯管韧性破坏寿命预测方法研究[J]. 压力容器, 2012, 29(1):1–6.
- Xu Cheng, Xu Ping, Shi Jianfeng, et al. Prediction of ductile rupture failure life of HDPE pipe[J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(1):1–6.
- [5] 黄展鸿,黄春芳,张鉴炜,等. 声发射技术在纤维增强复合材料损伤检测和破坏过程分析中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(4):1 122–1 128.
- Huang Zhanhong, Huang Chunfang, Zhang Jianwei, et al. Acoustic emission technique for damage detection and failure process determination of fiber-reinforced polymer composites: An application review[J]. Materials Review, 2018, 32(4):1 122–1 128.
- [6] 李伟,丁蕾,赵俊茹,等. FRP 复合材料拉伸过程的声发射特性实验研究[J]. 化工机械, 2009, 36(6):542–546.
- Li Wei, Ding Lei, Zhao Junru, et al. Experimental researches on the acoustic emission (AE) characteristics of the tensile process of FRP composite material[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2009, 36(6):542–546.
- [7] 郭冠华,刘斯以,吴伟,等. 蜂窝夹层复合材料的压缩损伤声发射特征[J]. 无损检测, 2013, 35(12):42–45.
- Wu Guanhua, Liu Siyi, Wu Wei, et al. Acoustic emission characteristics of compression damage in honeycomb sandwich composite[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(12):42–45.
- [8] 李伟,李颖,王少凡,等. FRP 复合材料容器水压爆破声发射特性分析[J]. 压力容器, 2012, 29(5):15–19.
- Li Wei, Li Ying, Wang Shaofan, et al. Analysis of acoustic emission characteristics for FRP composites vessels in hydrostatic burst test process[J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(5):15–19.
- [9] 马济美. FRP 复合材料容器损伤声发射特性研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
- Ma Jimei. The experimental study of the FRP composite material vessel damage by acoustic emission monitoring technique[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.
- [10] 华晔,武志军,熊志敏,等. 聚乙烯 (PE) 燃气管道近期发展动态[J]. 全面腐蚀控制, 2014, 28(4):34–40, 44.
- Hua Ye, Wu Zhijun, Xiong Zhimin, et al. The developing trends of polyethylene (PE) gas piping systems[J]. Total Corrosion Control, 2014, 28(4):34–40, 44.
- [11] 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 on principal component analysis to establish index weight[J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology, 2017, 31(6):519–523.
- [12] 赵春晖,陈立伟,马惠珠. 数字信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- Zhao Chunhui, Chen Liwei, Ma Huizhu, et al. Digital signal processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [13] 沈再阳. MATLAB 信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- Shen Zaiyang. MATLAB signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.

航空航天与汽车领域热塑性复合材料联盟组建

索尔维、德国飞机零配件制造商 Premium AEROTEC 与佛吉亚绿动智行系统公司宣布组成 IRG CosiMo (可持续流动性复合材料) 联盟, 该联盟是复合材料行业第一个由私企财团组建的研究性联盟, 专注于航空航天和汽车市场热塑性复合材料大规模生产所需的材料和工艺技术的开发。

通过为期 3 年的协议, 索尔维、Premium AEROTEC 与佛吉亚绿动智行系统公司将结合三方的专业知识、能力和资源, 为可持续性移动领域提供解决方案。综合利用材料资源、调整工业化节奏和加速汽车和航空航天领域产业升级是该联盟的工作重点。

与此同时, Premium AEROTEC 和佛吉亚绿动智行系统公司也是即将在德国巴伐利亚自由州启动的“Campus Carbon 4.0 计划”项目联盟 (简称 CC4.0 CosiMo) 的参与单位。该项目由公共赞助, 旨在开发新的材料和工艺, 用于将

己内酰胺原位聚合成 PA6, 大批量应用在汽车领域。

本次组建 IRG CosiMo 联盟是 CC4.0 CosiMo 联盟的延伸, 目标是更广泛的热塑性材料和工艺研发。作为 IRG CosiMo 的合作伙伴, 奥格斯堡纺织技术研究所将进行该联盟的工作主持和项目管理, 协调科研计划, 及加工带状和网格状热塑性复合材料的设备运作。 (复材展)

美国塑料产品产量现负增长

尽管第二季度美国经济总体表现强劲, GDP 增长率远高于长期趋势, 但美联储数据显示, 6 月美国塑料制品总产量比 2017 年 6 月降低 1%, 连续四个月下滑, 使整个第二季度的生产总量低于去年同期。

根据目前的数据以及去年下半年所经历的情况, 预计 2018 年第三和第四季度的增长率都将为负值。如果这一预测成立, 将导致今年的增长率为负值, 这将是自 2009 年以来美国塑料产品总产量首次负增长。 (环球塑化)