

基于超声的单螺杆挤出机聚合物混合状态表征方法研究*

韩 婧^{1,2} 陈友兴^{1†} 王召巴¹ 王 鹏^{1,2}

(1 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

(2 中北大学 信息与通信工程学院 太原 030051)

摘要 超声检测单螺杆挤出机中聚合物共混状态时, 螺杆结构对回波信号幅值的衰减有很大影响, 从而难以判别共混状态。本文分析了螺杆结构对超声回波信号的影响, 以超声传播时间为依据, 建立螺杆结构模型, 根据螺棱位置的回波幅度, 计算出低密度聚乙烯(LDPE)的衰减系数和不同螺杆位置的反射系数比, 通过拟合建立反射系数比与螺杆结构关系模型; 将上述模型应用到混合物中, 计算不同位置的传感器采集信号的衰减系数方差并以此表征聚合物混合状态的均匀性。实验结果利用样本的电镜扫描图验证: 上述建立模型及混合状态的表征方法可以较好地判别聚合物的共混状态。

关键词 聚合物, 超声检测, 螺杆模型, 混合状态

中图分类号: TB553

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2013)06-0488-07

Research on measurement methods of polymer compounding state in single-screw extruder based on ultrasonics

HAN Jing^{1,2} CHEN Youxing¹ WANG Zhaoba¹ WANG Peng^{1,2}

(1 The Ministry Key Lab for instrumentation science and dynamic test, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(2 School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract In the ultrasonic testing of polymer compounding state in a single screw extruder, screw structure has a great influence on the amplitude attenuation of echo signals which is difficult to distinguish blending state. Screw structure on the influence of ultrasonic echo signal was analyzed in this paper. Based on the echo time, screw structure model was established. According to the echo amplitude of screw edge location, the ratio of attenuation coefficient of low-density polyethylene (LDPE) and reflection coefficient of different screw location was calculated. The relationship model between reflection coefficient ratio and screw structure was established. Applying the model to the mixture, the variance of signals attenuation was calculated to characterize the uniformity of polymer blending state. The experimental results were verified by the electron microscopy scans of samples. The results show that the proposed method in this paper can

2013-04-27 收稿; 2013-08-05 定稿

*山西省科技攻关项目(20110321029)、国家自然科学基金(61201412)、山西省青年科技研究基金(2012021011-5)

作者简介: 韩婧(1987-), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

陈友兴(1978-), 男, 副教授, 硕士生导师。 王召巴(1967-), 男, 教授, 博士生导师。 王鹏(1987-), 男, 硕士研究生。

† 通讯作者: 陈友兴, E-mail: chenyouxing@nuc.edu.cn

distinguish the polymer mixture uniformity effectively.

Key words Polymer, Ultrasonic testing, Model of screw, Mixed state

1 引言

聚合物螺杆挤出过程中,对聚合物共混状态的监测,可以有效提高生产效率,缩短新产品的研发周期,降低生产和研发成本^[1]。超声波在聚合物中传播受内部结构与材料性能影响较为灵敏,回波信号能为聚合物的检测提供较丰富的信息。因此,可以提取超声回波特征信号,判断聚合物共混的均匀程度。

目前, Franca 采用金属缓冲杆和超声探头监测了共挤聚合物的成型过程,研究了共挤聚合物两层之间分离以及螺杆结构对超声回波信号影响等问题,并通过维纳滤波技术进行信号处理^[2]。加拿大国家研究院工业材料研究所一直致力于超声波聚合物共混过程监测技术的研究,通过与神经网络的结合,根据填料类型、填料浓度、喂料速度、螺杆转速、腔体温度的不同,来监测聚合物填料的共混过程^[3-4]。但是他们均未给出超声回波信号和聚合物混合均匀度的关系。中北大学电子测试技术国家重点实验室,在国家自然科学基金的资助下,设计了用于聚合物螺杆挤出过程监测的超声缓冲杆^[5-8],并搭建了实验平台,做了相关研究,为后续实验提供了依据。

本文利用文献[8]中提到的实验平台,采集超声回波信号。超声在高温熔体的聚合物共混体中传播时,遇到填充料会发生散射,此时回波信号的幅值会有明显的衰减,且填充料越多,衰减越大。因此

可通过比较超声回波信号幅度的衰减变化,判断聚合物共混的均匀程度。在挤出机中,回波信号是由螺杆反射的回波信号,其反射衰减比(超声波不能垂直入射时,接收到的反射波的能量会减少,本文将接收到的反射波幅值与入射波幅值的比值称为反射衰减比)会随着螺杆结构变化而变化,为了校正螺杆结构对回波信号的影响,本文建立了螺杆结构与反射衰减比的关系模型,从而更加准确表征聚合物共混状态。

2 超声检测系统

图 1 是单螺杆挤出机共混状态检测装置示意图。聚合物与填充料在挤出机中经历加料段、熔融段和熔体输送段三部分。加料段和熔融段前端,聚合物还未全部融化,不能采到螺杆的回波信号,因此,如图 1 所示位置将超声传感器安装在熔融段后端、熔体输送段和挤出机出口处(传感器编号为 U1、U2、U3),以检测聚合物的混合程度。检测装置中挤出机控制系统用于调整螺杆转速,控制挤出机挤出速度,超声采集系统通过工控机中的超声采集接收卡采集 3 个超声传感器的回波信号,此外还可对采集到的数据保存与显示。超声采集卡的采样频率为 100 MHz, 8 位量化采样,量程为 -1 V~1 V。超声探头的中心频率为 5 MHz。本文利用图 1 装置分别采集挤出纯 LDPE(低密度聚乙烯)、LDPE 和碳

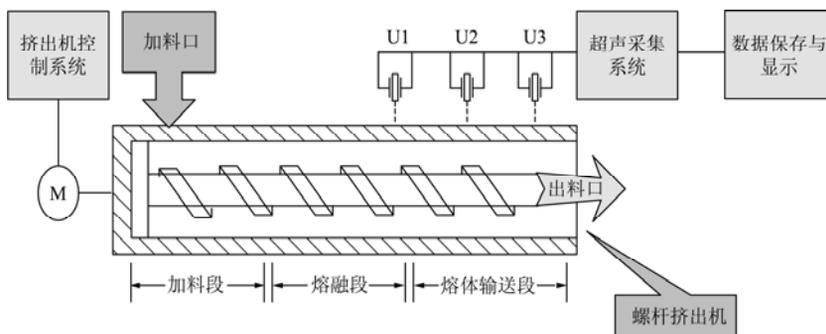


图 1 超声检测实验装置示意图

酸钙混合物（质量比为 9:1）的超声回波信号。多通道超声采集接收卡同时采集 3 个传感器的信号，每间隔 0.2 s 采集一次。

3 检测结果与分析

将采集的信号绘制成 B 扫描图分析检测结果，如图 2(a)和(b)分别是纯 LDPE、LDPE 和碳酸钙混合物（质量比为 9:1）挤出 U3 传感器回波信号的 B 扫描图，横坐标是超声波传播时间（单位 μs ），纵坐标是检测时间（单位 s），灰度值代表幅值大小。

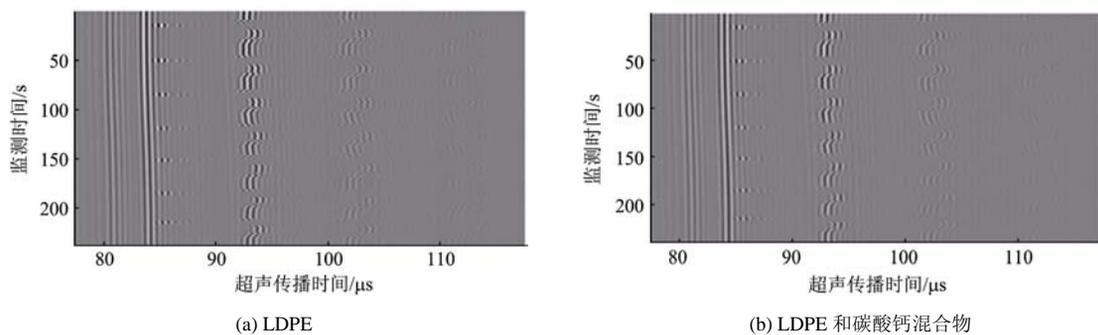


图 2 不同材料挤出超声回波信号 B 扫描图

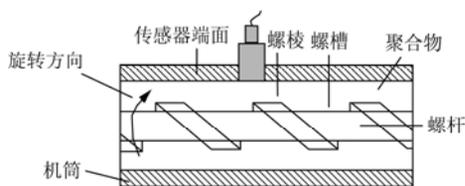


图 3 传感器和挤出机示意图

图 4 为螺杆不同位置的典型回波。在螺棱和螺槽位置，超声波始终保持垂直入射，其幅值衰减只与聚合物有关。当传感器正对螺槽处时，超声回波信号包含 D 回波（传感器端面反射回波）和 C1 回波（螺槽反射一次回波），可能还存在二次回波 C2 和三次回波 C3；当超声传感器正对螺棱处时，超声回波信号中包含 D 回波和 L 回波（螺棱反射回波）。在螺棱与螺槽的交界处，存在超声波斜入射的情况，当入射角接近 90° 时，传感器接收到的回波信号能量变小，幅值减小，如图 4(a)所示波形；当入射角过大或过小时可能接收不到回波信号，回波

由图 2 看出超声回波信号的幅值大小和传播时间会随着螺杆旋转产生周期性变化，而且，由于螺杆结构的不均匀这一周期会产生偏差。因此，在不同周期采集的信号中，很难匹配相同位置、相同条件下的回波信号，以判断聚合物混合状态。

假设挤出机机筒到螺杆的距离相同，回波信号的幅值衰减变化即可表征机筒内聚合物的混合状态。而实际中，如图 3 所示，由于螺杆的螺棱和螺槽交替变化，使得传感器端面到螺棱和螺槽的距离不同，因此，超声传波时间也不同，回波信号幅值衰减的大小也不同。

信号幅值的变化不仅有聚合物产生的衰减，还有由于斜入射产生的反射衰减。因此，可能同时存在 D 回波、L 回波和 C1 回波，也可能只存在 D 回波，如图 4(d)所示波形。在螺杆一个旋转周期内，回波信号按上述规律循环变化。由此，可看出其幅值的衰减与螺杆的结构的关系。

因此，本文采用下面方法表征聚合物共混状态。

在纯 LDPE 挤出时，提取螺棱和螺槽的超声传波时间，建立传感器安装位置截面的螺杆结构模型。依据螺棱处与传感器端面（图 3 中所示位置）的回波幅度计算纯 LDPE 衰减系数，再利用该衰减系数校正螺槽处回波，计算螺杆不同位置的反射系数比，从而建立螺杆结构与反射系数比的关系模型。

在混合物中，利用所求模型，校正由于螺杆结构的变化产生的反射衰减，最后计算混合物的衰减系数，利用其方差表征聚合物的混合状态。

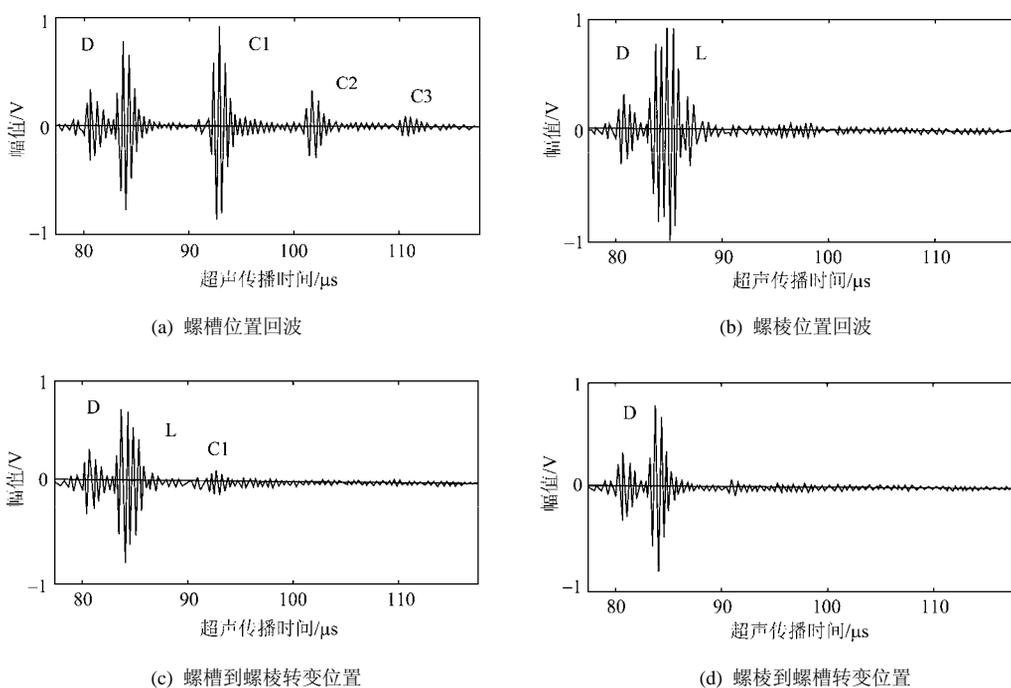


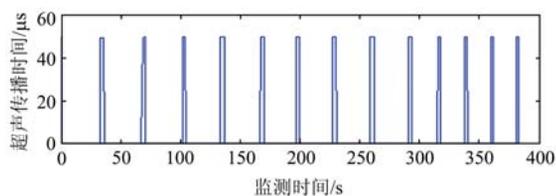
图 4 螺杆不同位置典型回波

4 数据处理与状态表征

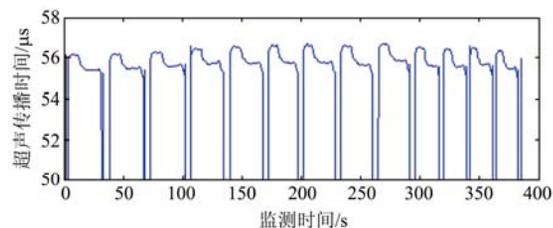
4.1 建立螺杆结构与反射系数比关系模型

以 U3 传感器采集的信号为例建模，U1、U2 位置同理。

提取螺棱、螺槽的超声传播时间，如图 5 所示。



(a) 螺棱回波传播时间



(b) 螺槽 1 次回波传播时间

图 5 螺棱与螺槽回波传播时间

依据螺棱与螺槽回波传播时间差，以及 LDPE 超声传播声速，求得传感器端面到螺杆的距离 L_1 ，如图 6 所示。

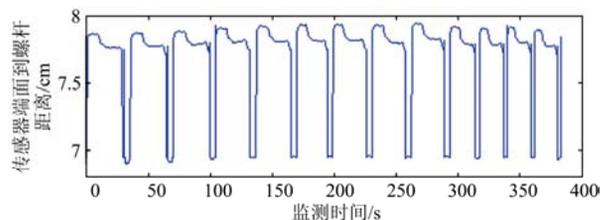


图 6 传感器端面到螺杆距离

通过拟合，建立螺杆结构模型。如图 7 所示。

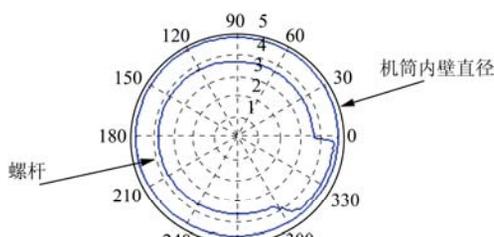


图 7 螺杆结构模型

图 7 螺杆结构与实际中使用的螺棱直径为 9 cm 的螺杆尺寸相符。说明了该模型建立的正确性。

提取传感器端面，螺棱回波幅值和螺槽一次回

波幅值,如图8所示。

由图8(a)和(b)(c)对比可知,螺棱、螺槽回波的幅值,与传感器端面回波幅值有相同的变化趋势,这是由于机筒内温度的变化导致的。因此,可利用传感器端面回波校正由于温度变化产生的螺棱螺槽回波幅值变化趋势。结果如图9所示。

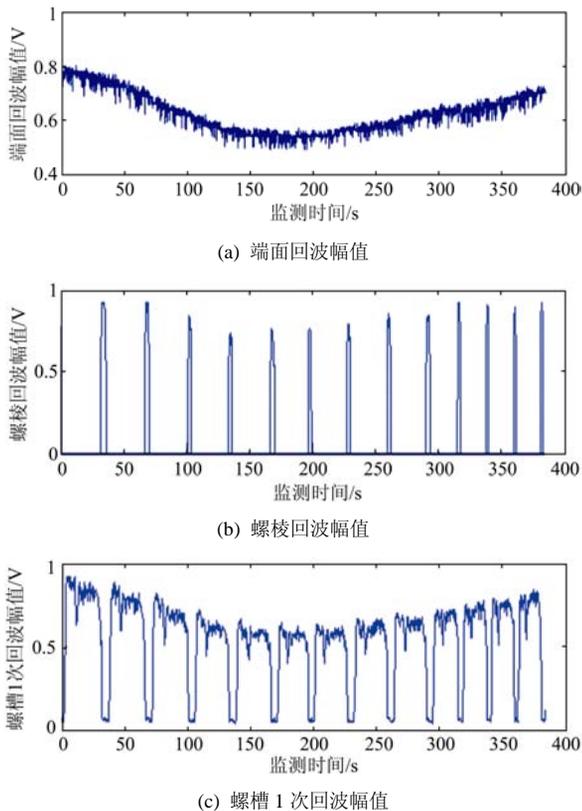


图8 传感器端面及螺棱各位置回波幅值

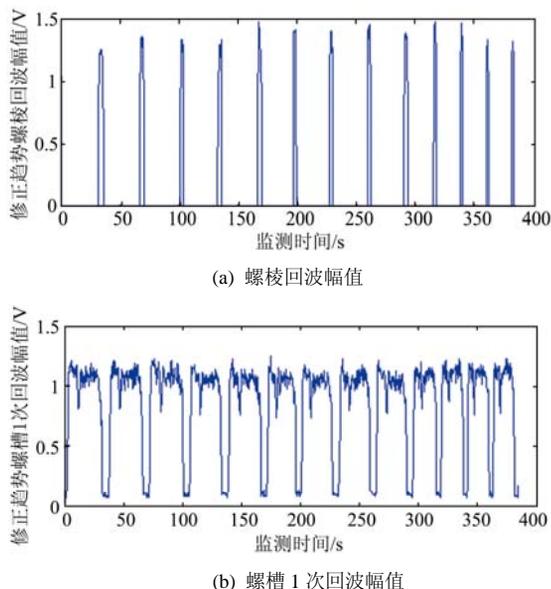


图9 校正温度变化产生的趋势

在螺棱处,超声波垂直入射螺棱表面,此时回波幅值变化为LDPE中的衰减所致,衰减系数只与传播介质的性质有关,因此可利用公式(1)计算LDPE中的衰减系数 α 。

$$\alpha = \frac{1}{2L} * 20 \frac{A_1}{A_2}, \quad (1)$$

式中 L ——传感器端面到螺棱位置的距离; A_1 ——修正后的端面回波幅值; A_2 ——螺棱一次回波幅值。

在螺槽处,由于螺棱结构的不均匀,超声波有时会斜入射螺棱表面,造成反射衰减,利用前面求出的螺棱结构模型,可知传感器端面到螺棱的距离,将螺棱回波幅值和螺槽一次回波幅值拼接如图10所示,得到螺棱回波幅值,结合公式(2)计算螺槽表面的反射系数比 R 。此时的反射系数比与螺棱的结构一一对应。

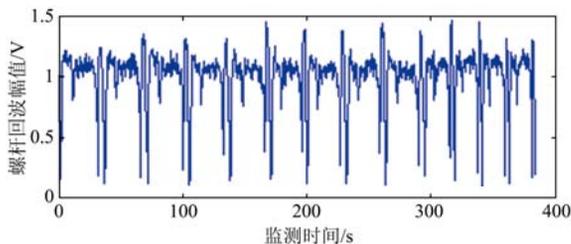


图10 螺棱回波幅值

$$R = \frac{A}{A_1 e^{\alpha L_1}}, \quad (2)$$

式中 L_1 ——传感器端面到螺棱的距离; A_1 ——修正后的端面回波幅值; A ——螺棱回波幅值

通过拟合,与螺棱的旋转角度对应,求出螺棱各个位置的反射系数比,从而建立螺棱结构与反射系数比的关系模型。如图11所示。

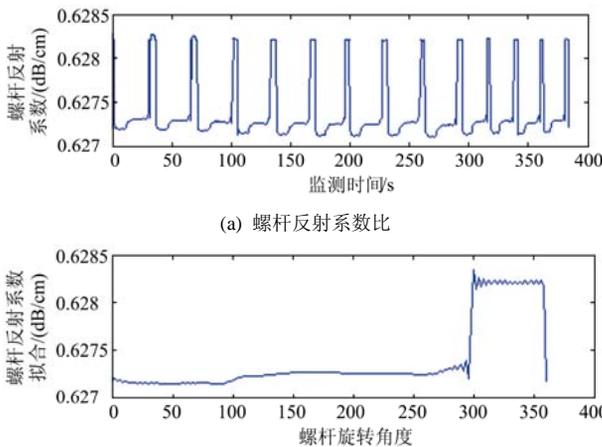


图11 螺棱反射系数

采用相同的方法, 对 U1 和 U2 采集的信号做相同处理, 得到相应位置的反射系数与螺杆结构关系。

4.2 表征聚合物共混程度

将求得的 U1, U2, U3 处螺杆反射系数带入 LDPE 与 10% CaCO₃ 共混时的数据中, 可求出传感器各个位置超声波在混合物中的衰减系数, 并利用公式(3)求取衰减系数的方差。式中 α 为衰减系数, n 为采样次数, β 为衰减系数方差。

$$\beta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2 \quad (3)$$

采用相同方法求取不同位置的传感器采集信号的衰减系数方差, 如图 12 所示。传感器越靠近出料口, 衰减系数方差越小, 即超声波穿过聚合

物后, 信号幅值衰减的变化越小, 聚合物混合的越均匀。

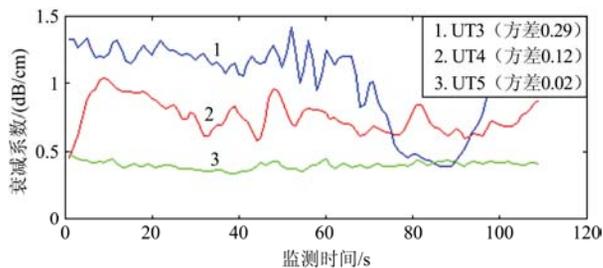


图 12 LDPE 和碳酸钙混合物 (质量比为 9:1) 衰减系数及方差

图 13 是混合物相应位置样本的电镜扫描图, 可以看出(c)图中的样本混合较均匀, 基本没有块状物的出现, (a)(b)图中的样本明显成块出现, 从 U1 到 U3 样本逐渐向均匀转变, 从而验证了实验结果。

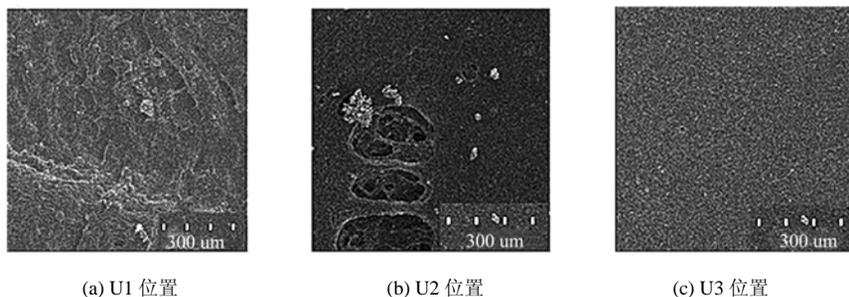


图 13 电镜扫描图

5 结论

本文采用超声检测技术, 研究聚合物在单螺杆挤出机中的混合状态。通过分析超声传播时间, 建立检测截面上的螺杆结构模型, 根据螺棱位置的回波幅度, 计算出纯净物 LDPE 的衰减系数和不同螺杆位置的反射系数, 通过拟合建立反射系数比与螺杆关系模型。

在 LDPE 和碳酸钙混合物 (质量比为 9:1) 中利用所建模型校正螺杆结构对回波信号的影响, 计算该混合物不同位置传感器的衰减系数, 通过比较衰减系数方差以及电镜扫描图的验证, 说明, 越靠近挤出机出料口位置, 聚合物混合越均匀, 衰减系数的方差越小。

参 考 文 献

- [1] 张雪琴, 毋伟, 曾晓飞. 纳米 CaCO₃ 复合微粒对 ABS 性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 26(1): 107-110.
- [2] FRANCA D R, JEN C K, NGUYEN K T, et al. Ultrasonic in-Line monitoring of polymer extrusion[J]. Polymer Engineering and Science. 2000, 40(7): 82-94.
- [3] SUN Z, JEN C K, SHIH C K. Application of ultrasound in the determination of fundamental extrusion performance: residence time distribution measurement[J]. Polymer Engineering and Science, 2003, 43(1): 102-111.
- [4] JEN C K, CAO B, NGUYEN K T, et al. On-line ultrasonic monitoring of a die-casting process using buffer rods[J]. Ultrasonics, 1997, 35(6): 335-344.
- [5] 陈友兴. 用于聚合物螺杆挤出过程监测的超声缓冲杆[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(1): 158-161.
- [6] CHEN Y X, WANG Z B, ZHENG J L, et al. Analysis of Sound Ray Theory and FEM for Ultrasonic Propagation in a Finite Rod[J]. Indian Journal of Pure & Applied Physics. 2009, 47(8):

572-575.

[7] CHEN Y X, WANG Z B, ZHAO X, et al. Ultrasonic Monitoring Technology for Polymer Compounding Extrusion[J]. Journal of

Testing and Evaluation. 2010, 38(1): 83-87.

[8] 陈友兴. 聚合物共混状态超声在线监测技术应用基础研究[D]. 博士学位论文. 山西太原: 中北大学, 2010.

2013年声频工程学术论坛暨学术交流年会在广州召开

2013年声频工程学术论坛暨学术交流年会于2013年9月23日-26日在广州召开。

这次会议是由中国电子学会声频工程分会和中国声学学会声频工程分会联合举办的, 有11家单位参与协办, 4家单位参与支持, 5家公司参与赞助。

中国声学学会宗健常务副理事长到会指导工作; 三所李兆利副所长作为中国声学学会声频工程分会的主任委员, 参加了会议并对学会工作作了指导。

本次会议有近300人参加, 他们来自全国的本行业内的专家、学者和科研人员、工程技术人员和生产企业的一线人员代表, 以及许多企业的领导和技术负责人。

今年的学术论坛活动是声频工程分会在国内举办的第26届综合性的学术交流活动, 安排有特邀专题报告, 分会场报告, 技术演示讨论和推介企业与产品等活动。

本次会议邀请了国内多位在声频科研、教学和生产一线的专家, 分别就声频及相关研究领域在国际、国内的新进展作详细的综述报告。他们主讲的内容是:

1. 电声技术新进展 (杨军——中科院声学所);
2. 空间声的原理与研究进展 (谢波荪——广州华南理工大学);
3. 智能多媒体终端中的声信号处理 (李晓东——中科院声学所);
4. 适用于便携通信设备的小尺度声学阵列研究 (卢晶

——南大声学所);

5. 新形势下电子工程建设标准的制定与实施 (薛长立——工信部)

6. 软件无线电(SDR)的发展前景 (梁伟 胡铁军——德生通用电器制造有限公司、中山大学)。

另外还有5家企业参与了推介企业与产品活动。

除了以上特邀大会报告外, 我们还组织了60多篇论文, 在会议上进行针对性的交流。涉及内容有: 电声器件、测量及应用; 声频设备、系统与工程; 心理声学及主观评价; 声信号处理与通信声学等。尤其是随着计算机、多媒体、信号处理和通信技术的发展, 声频技术已突破传统电声范畴, 扩展到电声、声信号处理、室内声学、心理与生理声学、语言声学、音乐声学等, 并且与互联网和计算机技术、人类听觉感知、通信、多媒体与虚拟现实、生物医学工程等高科技领域密切相关, 成为一个跨学科的研究体系。因此, 本会今年特别注重了突破传统声技术方面的技术与信息交流。

综上所述, 今年的学术交流年会是对特定专题中相关的各种理论研究和实践应用的集中讨论, 涉及各种相关理论与应用问题, 同时也是一种跨学科的学术交流。我们相信, 这有益于拓展技术人员的视野和思路, 促进和推动我国电声及声频工程领域的技术进步和发展。

(声频工程分会)