

往复式单螺杆销钉挤出机停留时间分布研究

毕超 江波

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要 使用 Polyflow 软件对往复式单螺杆销钉挤出机(Buss 机)三类典型螺纹元件的停留时间分布(RTD)进行了三维动态模拟,分析了工艺条件和物料特性对 RTD 的影响。根据 Buss 机的螺杆组合构型,应用卷积技术求得了物料沿整根螺杆的 RTD 曲线,探讨了物料在 Buss 机内的 RTD 规律与工艺条件变化的相关性。

关键词 往复式单螺杆销钉挤出机 停留时间分布 有限元模拟 卷积

往复式单螺杆销钉挤出机(以下简称 Buss 机)是一种特殊的单螺杆挤出机。在加工过程中其螺杆旋转的同时还会产生沿轴向的往复运动,在销钉的搅拌和销钉与螺棱的强烈剪切作用下,物料可得到较好的分散、分布混合效果^[1-4]。

通过对物料在挤出机内停留时间分布(RTD)的研究,可以预测物料所受的剪切变形总量和热历程,为混炼塑化质量的量化评价和控制提供科学依据,因此 RTD 的研究引起了专家和学者们的热切关注^[5-11]。然而由于 Buss 机的运动机理与单、双螺杆挤出机有着本质的区别,物料在 Buss 机内的运动轨迹更为复杂,因此迄今为止对物料在 Buss 机内的 RTD 研究还处于起始阶段。

笔者使用 Polyflow 软件对 Buss 机三类典型螺纹元件的 RTD 进行了三维动态模拟,分析了工艺条件和物料特性对 RTD 的影响。根据 Buss 机的螺杆组合构型,应用卷积技术求得了物料沿整根螺杆的 RTD 曲线,探讨了物料在 Buss 机内的 RTD 规律与工艺条件变化的相关性。

1 RTD 定义

RTD 研究^[12]最早出现在化学反应工程领域,主要应用于分析物料在反应器内的流动情况,进而分析其反应程度。实验研究中,在测得反应器出口处示踪物质浓度 $C(t)$ 后,可计算 RTD 函数 $E(t)$ [式(1)]和累积 RTD 函数 $F(t)$ [式(2)]。除了这两个函数之外,RTD 研究还经常应用到平均停留时间 τ [式(3)]和分布方差 σ^2 [式(4)]这两个特征值。

$$E(t) = \frac{C(t)}{\sum_{0}^{\infty} C(t) \Delta t} \quad (1)$$

$$F(t) = \sum_{0}^t E(t) \Delta t \quad (2)$$

$$\tau = \sum_{0}^{\infty} t \cdot E(t) \Delta t \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \sum_{0}^{\infty} (t - \tau)^2 \cdot E(t) \Delta t \quad (4)$$

2 有限元数值模拟

笔者采用网格重叠技术计算物料在 Buss 机螺纹元件内的流场。计算中综合考虑了螺杆的周向旋转运动和轴向往复运动,螺杆每旋转 10° 计算一次速度场。在求得每个位置的速度场分布后,应用粒子轨迹跟踪(PTA)技术计算了初始时布置在螺纹元件入口约 1 000 个粒子在螺纹元件内的流动轨迹,使用统计模块 Polystat 计算物料在螺纹元件内的 RTD。

以自行研制的 WXJ-45 型 Buss 机为研究对象,其螺杆组合形式见图 1,三类典型螺纹元件三维模型见图 2。螺纹元件的特征参数及功能见表 1。

在有限元网格划分中,螺纹元件及带有销钉的

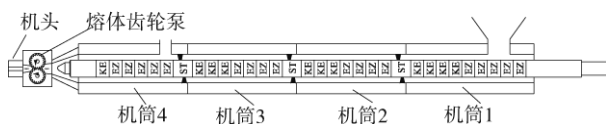
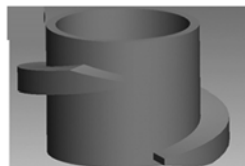
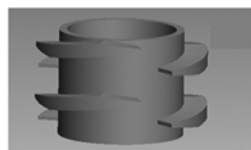


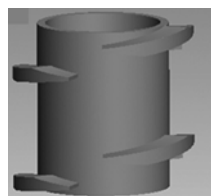
图 1 螺杆组合形式



(a)



(b)



(c)

a—输送元件 EZ; b—混合元件 KE; c—止逆环适应元件 ST

图 2 螺纹元件三维造型

表 1 Buss 机螺纹元件参数及功能

元件类型	长度/外径/ 内径尺寸/mm	机筒上销钉个数 (排数 × 每排个数)	功能
输送元件 EZ	27/45/32	2 × 1	输送物料
混合元件 KE	27/45/32	3 × 2	分布混合和 分散混合
止逆环适应元件 ST	40.5/45/32	3 × 2, 配有止逆环	建立压力

机筒采用四面体网格,而流道区域采用六面体网格。如图 3 所示,流道入口施加“inflow”边界条件给定体积流率;出口处施加“outflow”边界条件;与机筒内表面接触面速度为零;与螺杆根径接触面速度与螺杆速度相同,由圆周速度和往复速度两部分组成。圆周速度即为螺杆转动角速度 ω

$$\omega = 2 \pi N / 60 (\text{rad/s}) \tag{5}$$

式中: N ——螺杆转速,分别设为 100、200、300 r/min。

往复速度 $V_z(t)$ 可表示为:

$$V_z(t) = S_0 \omega \cos \omega t (\text{m/s}) \tag{6}$$

式中: S_0 ——螺杆的往复行程,为 6.75 mm。

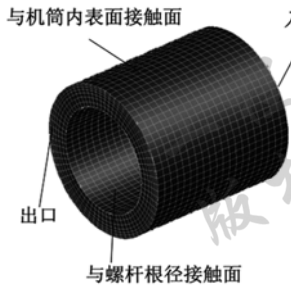


图 3 流道区域网格划分及边界条件

3 结果与讨论

3.1 非线性拟合

经 Polystat 统计分析得到 $E(t)$ 和 $F(t)$ 曲线数据的时间间隔不一致,无法进行卷积计算。为了使用卷积技术组合整根螺杆的 RTD 曲线,笔者使用 Zusatz 方程^[13]对 Polystat 的计算结果进行了非线性曲线拟合,以得到等时间的间隔数据。与 $E(t)$ 相比, $F(t)$ 曲线形式简单,为单调递增函数,所以曲线拟合时采用 $F(t)$ 。

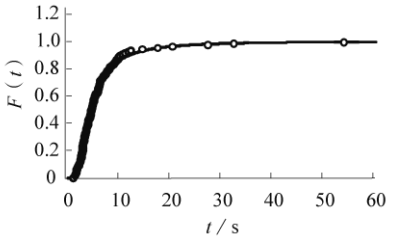
Zusatz 方程的表达式为:

$$E'(t) = a \frac{b}{t}^{(c+1)} \exp \left(-\frac{b}{t}^c - 1 \right) - \frac{c-1}{c} \tag{7}$$

其中 a 、 b 和 c 为模型参数。 $E'(t)$ 曲线具有 $E(t)$ 曲线特性。 $F'(t)$ 可定义为 $E'(t)$ 的积分:

$$F'(t) = \int_0^t E'(t) dt \tag{8}$$

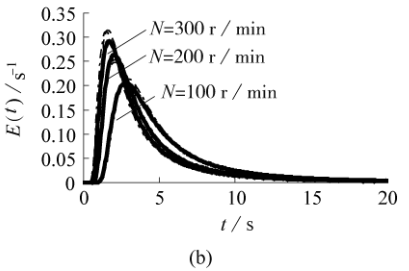
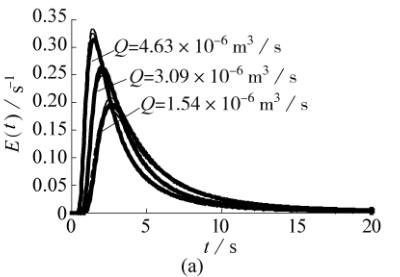
$F'(t)$ 与 $F(t)$ 相对应。拟合时就是使用 $F'(t)$ 的表达式来拟合 Polystat 统计得到的 $F(t)$ 数据,见图 4。从图 4 可以看出, Zusatz 方程拟合结果与 Polystat 统计得到的 RTD 数据基本重合,证明了使用 Zusatz 方程拟合 Polystat 统计得到的 RTD 数据的可行性。



——Zusatz 方程拟合曲线; ○—Polystat 统计结果
图 4 RTD 数据非线性拟合

3.2 工艺条件对 RTD 的影响

图 5 ~图 7 给出了三类典型螺纹元件在不同工艺条件下的 RTD 曲线。从图 5a、图 6a 和图 7a 可以看出,在相同螺杆转速(200 r/min)下,物料在不同螺纹元件内的停留时间 t 随喂料速率 Q 的增加而缩短;从图 5b、图 6b、图 7b 可知,在相同的喂料速率($3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)下,物料在螺纹元件内的停留时间随着螺杆转速 N 的提高而缩短。对比图 5、图 6 可以看出,螺杆转速和喂料速率对 EZ 元件和 KE 元件的 RTD 影响基本相同。喂料速率对 ST 元件 RTD 的影响明显比螺杆转速大(见图 7)。从图 5 ~图 7 还可以看出,在相同的工艺条件下,三类螺纹元件内不同粘度(3000、7500、12000 Pa·s)物料的 RTD 曲线基本重合。由此可见,物料粘度对 RTD 的影响很小。



a—喂料速率; b—螺杆转速

图 5 工艺条件对 EZ 元件 RTD 的影响

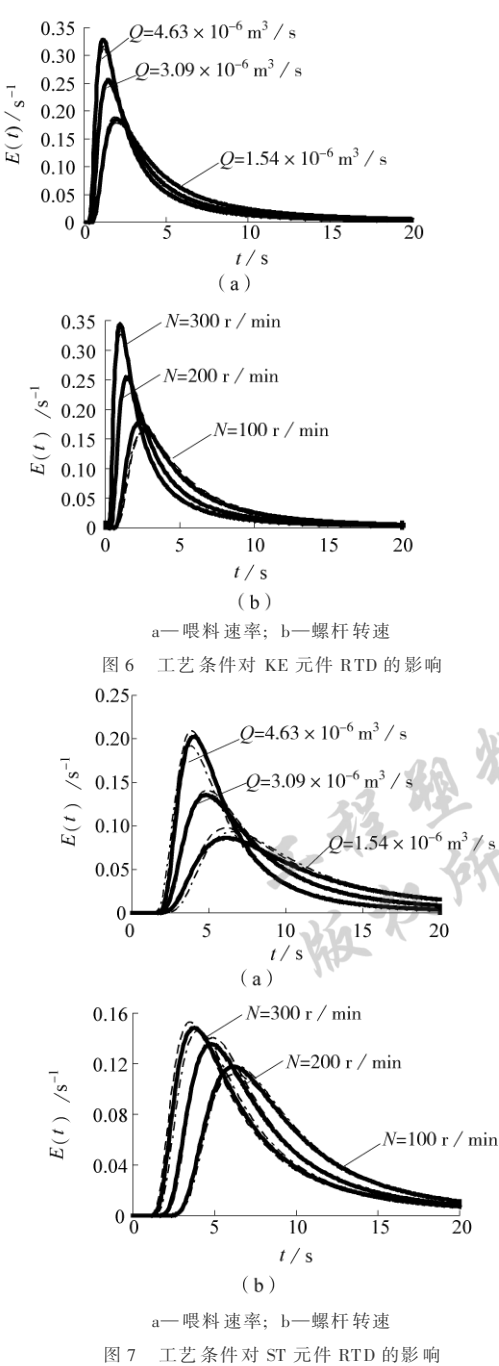


图6 工艺条件对 KE 元件 RTD 的影响

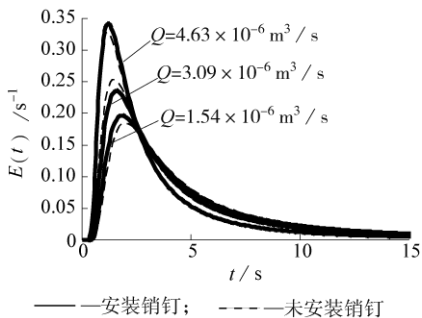


图8 机筒销钉对 Buss 机 RTD 的影响

ST 内的停留时间最长; 而 EZ 元件主要以输送物料为主, 所以物料在其内的停留时间最短。表 2 给出了平均停留时间 τ 和分布方差 σ^2 的具体数值。从表 2 可以看出, 往复运动中销钉的搅拌及物料的回流使得物料在 KE 元件内的分布方差要比在 EZ 元件内大很多; 虽然 ST 和 KE 两类螺纹元件处销钉数量是一样的, 但由于 ST 元件有效地阻止了物料回流, 所以物料在 ST 元件内的 RTD 分布方差要比在 KE 元件内小。EZ 元件螺棱上仅有一条轴向切槽, 回流少, 所以三类螺纹元件中以 EZ 元件的分布方差最小。

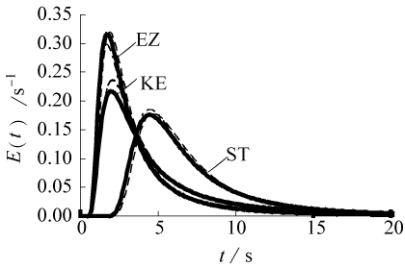


图9 三种螺纹元件 RTD 对比

表2 螺纹元件内平均停留时间和分布方差

$N / r \cdot min^{-1}$	$Q / m^3 \cdot s^{-1}$	粘度 / $Pa \cdot s$	KE 元件		EZ 元件		ST 元件	
			τ / s	σ^2 / s^2	τ / s	σ^2 / s^2	τ / s	σ^2 / s^2
100	3.09×10^{-6}	3000	9.0487	233.0483	7.0666	96.7714	2.0223	136.4784
100	3.09×10^{-6}	7500	9.6132	239.1915	7.0013	89.9313	2.5831	158.6751
100	3.09×10^{-6}	12000	9.8536	259.9126	6.7188	75.9134	1.9898	126.5124
200	3.09×10^{-6}	3000	7.0534	196.1723	5.7099	82.1644	0.4268	135.5876
200	3.09×10^{-6}	7500	6.8279	182.1717	6.1453	101.1495	0.0689	114.0708
200	3.09×10^{-6}	12000	7.1568	199.1605	5.9905	93.6814	0.5692	147.3918
300	3.09×10^{-6}	3000	5.8050	171.9778	5.3548	87.9903	9.7181	163.8307
300	3.09×10^{-6}	7500	6.1758	190.7067	4.9015	72.6167	9.4881	166.7841
300	3.09×10^{-6}	12000	6.0547	184.7927	5.1368	91.5149	9.7850	151.4240

3.3 机筒销钉对 RTD 的影响

以 KE 元件为例, 研究了机筒上安装的销钉对 Buss 机 RTD 的影响, 结果如图 8 所示。由图 8 可知, 相同的工艺条件下, 销钉对 KE 元件的 RTD 影响不明显。

3.4 三类螺纹元件 RTD 对比

图 9 给出了三类螺纹元件在相同工艺条件 ($4.63 \times 10^{-6} m^3 / s$, $100 r / min$) 下的 RTD 曲线。由图 9 可知, 三种螺纹元件中, 物料止逆环适应元件

3.5 RTD 组合

RTD 实验中, 在挤出机中注入示踪剂, 然后在出口处测量挤出物中示踪剂的浓度, 并绘制 RTD 曲线。示踪剂的注入时间通常很短, 可以将示踪剂看作一个 Dirac 脉冲信号^[14]。如果将挤出机作为一个

系统,那么 RTD 就是系统(挤出机)对 Dirac 脉冲信号(示踪剂)的响应。Buss 机螺杆为组合式,如果将整根螺杆看作一个总系统,那么组成螺杆的螺纹元件就可认为是其子系统。当假设每个子系统(螺纹元件)之间具有统计独立关系时,总系统(挤出机)对 Dirac 脉冲信号(示踪剂)的响应(RTD)就可以表示为每个子系统(螺纹元件)对 Dirac 脉冲信号响应的卷积^[15]。如图 10 所示,如果一根螺杆由两个螺纹元件组成,两个螺纹元件的 RTD 函数分别为 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$,那么螺杆的 RTD 函数 $E(t)$ 就可以表示为:

$$E(t) = E_1(t) \otimes E_2(t) \quad (9)$$

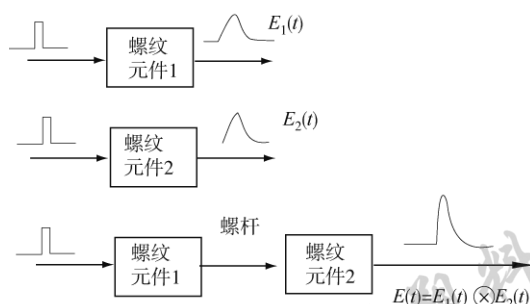
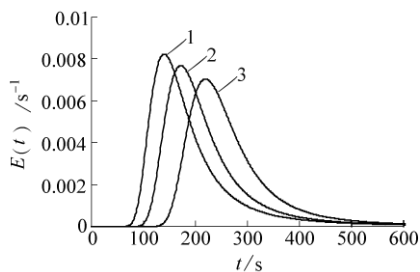


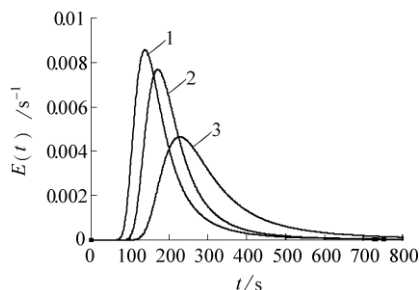
图 10 统计独立系统示意图

使用卷积技术组合得到的 Buss 机整根螺杆的 RTD 曲线如图 11、图 12 所示。由图 11 可见,在相同的喂料速率($3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)下,停留时间随螺杆转速的提高而缩短;由图 12 可知,在相同的螺杆转速(200 r/min)下,喂料速率越大停留时间越短;



1—300 r/min; 2—200 r/min; 3—100 r/min

图 11 螺杆转速对 Buss 机 RTD 曲线的影响



1— $4.63 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$; 2— $3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$; 3— $1.54 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

图 12 喂料速率对 Buss 机 RTD 曲线的影响

喂料速率对 RTD 的影响要大于螺杆转速的影响。上述工艺条件对 RTD 的影响态势与以往的实验研究结果^[5-7]是一致的。

4 结论

使用 Polyflow 软件计算了 Buss 机三类常见螺纹元件的 RTD。研究表明,物料在三类螺纹元件内的停留时间随螺杆转速和喂料速率的提高而缩短,而物料粘度的变化对 RTD 的影响很小。相同工艺条件下平均停留时间排序依次为 $ST > KE > EZ$, 分布方差排序为 $KE > ST > EZ$ 。通过对利用卷积技术得到的整根螺杆的 RTD 曲线的分析,表明在相同的螺杆转速下,喂料速率越大停留时间越短;在相同的喂料速率下,停留时间随螺杆转速的提高而缩短;喂料速率对 RTD 的影响要大于螺杆转速的影响。

参考文献

- [1] 武停启,江波,王春芬.往复式销钉螺杆挤出机设计原理[J].中国塑料,2002,16(1):70-73.
- [2] 武停启,江波,许嵩华.往复式销钉螺杆挤出机混合机理概述[J].中国塑料,2002,16(9):7-10.
- [3] 张宝辉,许嵩华,江波. WXJ-140 往复式销钉螺杆挤出机的研究与开发[J].塑料,2006,35(2):78-80.
- [4] White J L, Lyu M Y. Development of the modern Buss kneader and the study of its flow and mixing mechanisms[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 1998, 37(3):385-410.
- [5] Lyu M Y, White J L. Residence time distributions and basic studies of flow and melting in a modular Buss Kneader[J]. Polym Eng Sci, 1998, 38(9):1366-1377.
- [6] Hoppe S, Detrez C, Pla F. Modeling of a cokneader for the manufacturing of composite materials having absorbent properties at ultra-high-frequency waves. Part 1: Modeling of flow from residence time distribution investigations[J]. Polym Eng Sci, 2002, 42(4):771-780.
- [7] Bi Chao, Jiang Bo, Li Ao. Digital image processing method for measuring the residence time distribution in a plasticating extruder[J]. Polym Eng Sci, 2007, 47(7):1108-1113.
- [8] Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering[M]. Second Edition. New York: Wiley, 1992:253-314.
- [9] 胡冬冬,陈晋南.啮合同向双螺杆挤出机中组合螺杆性能的数值研究(I)瞬态流场分析[J].中国塑料,2005,19(3):90-100.
- [10] 胡冬冬,陈晋南.啮合同向双螺杆挤出机中组合螺杆性能的数值研究(II)混合特性分析[J].中国塑料,2005,19(6):103-109.
- [11] Bravo V L, Hrymak A N, Wright J D. Study of particle trajectories, residence times and flow behavior in kneading discs of intermeshing co-rotating twin-screw extruders[J]. Polym Eng Sci, 2004, 44(4):779-793.

[12]

Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering[M] . Second Edition. New York: Wiley, 1992: 253 – 314 .

[13]

Zhang Xianming, Xu Zhongbin, Feng Lianfang, et al. Assessing local residence time distributions in screw extruders through a new in-line measurement instrument[J] . Polym Eng Sci, 2006, 46(4) : 510 – 519.

[14]

郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统上册[M] . 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2000: 18 – 19 .

[15]

程佩青. 数字信号处理教程[M] . 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2001: 177 – 183 .

STUDY OF THE RESIDENCE TIME DISTRIBUTION IN THE BUSS KNEADER

Bi Chao, Jiang Bo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

ABSTRACT The residence time distributions(RTD) of the common screw elements in the Buss kneader were calculated by the Polyflow software. The effects of the operating conditions and the character of the material on RTD were analyzed. Based on the screw configuration, the RTD of the whole screw was assembled by the convolution technique. The influences of the operating conditions on RTD in the Buss kneader were discussed.

KEYWORDS Buss kneader, residence time distribution, finite element simulation, convolution

中国工程塑料工业协会加工应用专业委员会发展会员单位的通知

各有关单位:

中国工程塑料工业协会加工应用专业委员会隶属于中国工程塑料工业协会, 是一个跨地区、跨部门、跨行业、跨学科的, 本着自愿原则, 以工程塑料加工应用为纽带, 集工程塑料原料生产、加工、应用, 仪器设备及模具制造的企事业单位于一体的社团组织。其宗旨是贯彻为行业、为企业服务的原则, 产学研相结合, 通过经济技术研讨, 新产品开发、技术改造、难题招标等多种交流形式, 推动我国工程塑料行业的发展, 同时促进大专院校、科研院所与生产企业之间的相互了解和合作。本专委会愿意吸收更多的单位以及专家和企业家人会, 我们将以协会会刊《工程塑料应用》和“工程塑料网”为会员提供全方位的服务, 积极开展各种形式的交流活动。

一、会员权利和义务

1. 获颁会员单位不锈钢铭牌。2. 优先参加本专委会举办的各项活动, 参加研讨会的代表每人少交 200 元会务费。3. 可在《工程塑料应用》杂志“会员之窗”栏目刊登企业介绍, 占 1/2 版; 每年刊发供求信息 2 次, 占 1/4 版。4. 可在《工程塑料应用》杂志刊登 1/2 版黑白广告。5. 可在“工程塑料网”作首页文字链接 6 个月, 下载资料 1000 点, 下载网络版期刊 12 期, 网上展厅展示 6 个月, 发布企业信息 50 条, 浏览信息不限制。并可在“供求栏目”发布信息, 在“人才招聘”栏目发布求职和招聘信息。6. 获赠《工程塑料应用》全年 12 期杂志。7. 获赠专委会论文集《2000 年 ~2007 年》光盘。8. 优先在本协会会刊《工程塑料应用》和《化学分析计量》杂志上发表论文。9. 优先取得本专委会提供的信息资料和咨询服务。10. 在技术合作、成果转让、人才培养等方面享受优先和优惠待遇。11. 会员应遵守本会章程, 执行本会决议, 完成本会委托的工作, 按期缴纳会费, 会费每年 2000 元。

二、入会手续

由单位提出书面申请, 填写中国工程塑料工业协会加工应用专业委员会会员单位登记表(见附表), 加盖单位公章后寄回或传真至专委会秘书处, 经专委会审批通过, 交纳会费(有关汇款信息请参见第 87 页), 即可成为会员单位。

专委会秘书处联系人: 李桂珍 张锐 孙安垣

通信地址: 山东省济南市 108 信箱杂志社 邮编: 250031

电话: 0531 – 85878057 85878278 传真: 0531 – 85947355 85878224

E-mail: epa@epa1973.com 网址: www.epa1973.com

中国工程塑料工业协会加工应用专业委员会会员单位登记表

编号:

单位名称					邮 编	
详细地址					传 真	
法人代表		电 话			手 机	
联系人		电 话			手 机	
网 址				E-mail		
单位简介	请另附纸填写,可传真、可发电子邮件。请注明业务范围、产品名称、产量、产值及利税情况等。					