

双转子连续混炼机混炼段分散混合效率的研究

刘晓鸣 谢林生 马玉录

曹文凤

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237) (江苏工业学院机械工程学院, 常州 213016)

摘要 利用有限元分析软件 Polyflow 对自行设计的 ECM30 型双转子连续混炼机转子的混炼过程作了三维等温流场分析, 借助于剪应力和混合指数对转子的分散混合效率进行了分析研究; 讨论了不同的操作工艺对分散混合效率的影响。该数值模拟的结果将有助于针对不同的聚合物采用不同的混炼工艺, 使得聚合物在转子中的混合达到最优化。

关键词 双转子连续混炼机 混炼段 数值模拟 三维等温流动 混合效率

双转子连续混炼机的混合特性主要是由其特殊的转子形状所决定的。转子通常由加料段、混炼段、卸料段组成, 而物料的混合过程主要发生在混炼段。由于转子结构比较复杂, 目前对混炼机转子混炼段流场的理论研究还局限于较为简单的模型^[1~3]。精确分析转子的混合效率还比较困难, 这在一定程度上阻碍了人们对该设备优异混合特性的认识和了解, 影响了该设备的推广、应用。而实验研究虽然是最准确、最直接的研究方法, 但是非常耗时费力, 从转子的配型、加热、正常混炼、制备试样到清理混炼机、测试数据, 整个过程要耗费大量的人力和物力; 再者由于受到测试技术的限制, 实际的实验中只能得到有限的实验数据。就这几点而言, 采用计算机模拟不失为一种先进的手段。近年来针对双螺杆挤出、混合过程的数值模拟取得了很大的进展^[4~7], 但对于双转子连续混炼机的模拟却鲜有报道。因此笔者利用数值模拟的方法对 ECM30 型双转子连续混炼机的混合过程进行了模拟, 这将有助于了解该设备的混合特性, 对更好地发挥设备的效能、提高混炼效率及保证产品质量具有很重要的意义。

1 转子的几何参数和网格处理

双转子连续混炼机转子的混炼段由两对旋向相反、螺旋角各不相同的大螺旋角螺棱所构成。由加料段输送的物料在混炼段受到该两对螺棱的挤压、粉碎, 从而被捏合、熔融、混合、塑化, 然后通过卸料段由卸料门排出。

图 1 为双转子连续混炼机转子混炼段流场区域的网格划分。转子的直径为 0.027 m, 长度 0.08 m, 机筒内径 0.03 m, 两转子的中心距 0.032 m。

2 数学模型

2.1 基本假设

进行三维流场计算时, 考虑到熔体输送的具体



图 1 混炼段流场区域的网格划分

条件及聚合物的特性, 假设为: ①熔体为不可压缩流体; ②流场为稳定、等温流场; ③流动为层流; ④惯性力、重力等体积力远小于粘滞力, 可忽略不计; ⑤熔体在流道内完全充满, 满足润滑条件; ⑥熔体与流道壁面之间无滑移。

2.2 数学方程

根据以上假设, 在笛卡尔坐标系下, 连续性方程、运动方程、本构方程分别为:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0$$

$$\boldsymbol{\tau} = 2\eta \dot{\boldsymbol{\gamma}} D$$

式中: $\mathbf{v}$ ——速度向量;

P ——压力;

$\boldsymbol{\tau}$ ——应力张量;

$\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ ——剪切速率;

D ——形变速率张量;

η ——剪切粘度。

聚合物熔体为非牛顿型熔体, 其表观粘度与剪切速率的关系可由 Carreau 模型给出:

$$\eta = \eta_0 (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2}$$

式中: η_0 ——零剪切粘度;

λ ——Carreau 模型参数;

n ——非牛顿指数。

采用高密度聚乙烯作为模拟用材料, 其 Carreau 模型参数为: $\eta = 1520 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda = 0.08$, $n = 0.5$, 密度 $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$ 。

2.3 边界条件

计算中采用的边界条件为: 两个转子为异向向内旋转, 转速为 600 r/min , 入口流量为 20 kg/h , 机筒内壁和螺杆表面无滑移。

全部计算工作均使用 Polyflow 3.9.2 在 Dell power edge 430 服务器上完成的。计算采用的收敛精度为 10^{-5} , 完成所有计算约需 14 h 。

2.4 混合指数的定义

判断分散混合能力一般是通过剪应力来实现的。为了弄清混合能力, 大多数研究者对流场的剪切速率进行了计算。通过对简单的剪切和拉伸流动中颗粒破碎过程的研究表明, 拉伸流动对分散混合更为有效, 特别是对于具有高粘度比和低界面张力熔体的分散混合^[8]。因此也有人对流场中的拉伸速率进行了计算。Cheng Hongfei、Y. Chin-hsiang 等^[9,10]在研究这一问题时, 为了使拉伸流动和旋转流动量化, 从而定义流场特征, 引入混合指数 λ , 即为:

$$\lambda = \frac{|D|}{|D| + |\omega|}$$

式中: ω ——旋度张量的大小。

λ 的范围为 $0 \sim 1$ 。对于纯旋转运动, $\lambda = 0$; 对于简单剪切运动, $\lambda = 0.5$; 对于纯拉伸流动, $\lambda = 1$ 。

3 数值模拟结果与讨论

3.1 流场内速度向量和 Z 向速度的分布

图 2 为距入口不同距离 (Z) 的截面上的速度向

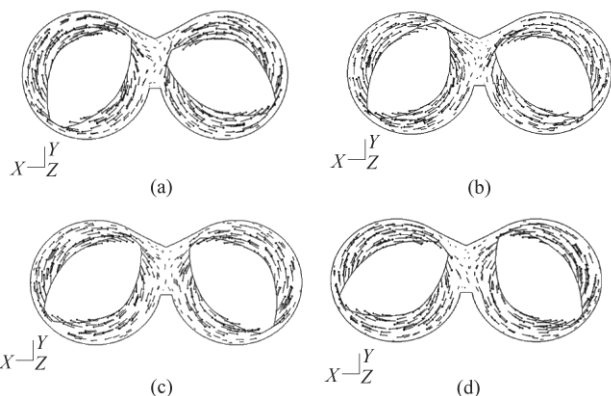


图 2 不同轴向截面的速度向量分布

量分布。从图 2 可以看到, 在每一个混炼腔体中随着转子的转动, 物料熔体产生了周向运动, 在转子的交汇区存在着物料的交流流动。

图 3 为不同轴向截面的 Z 向速度分布。由于转子的各段螺棱角度不同, 所以在不同截面上转子之间的 Z 向速度不同。在 $Z = 0.028, 0.032 \text{ m}$ 这两个截面上转子之间的 Z 向速度为负值。这说明在该区域内熔体存在回流流动, 即返混的作用。而正是这种返混作用使得连续混炼机具有优异的分散混合效果和轴向混合特性, 有利于抵消物料轴向组分的不均匀性。

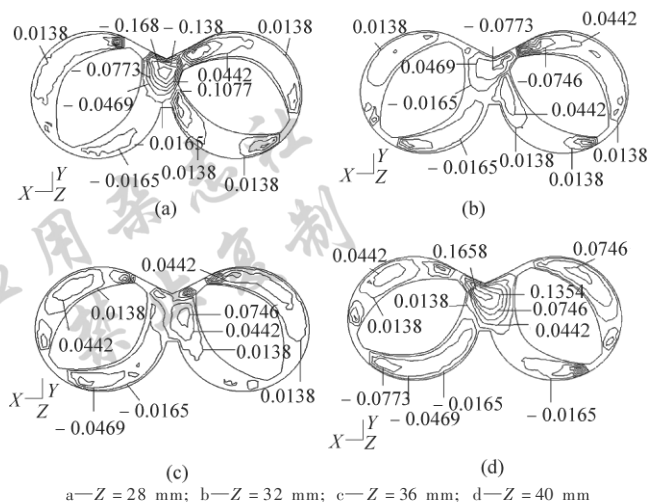


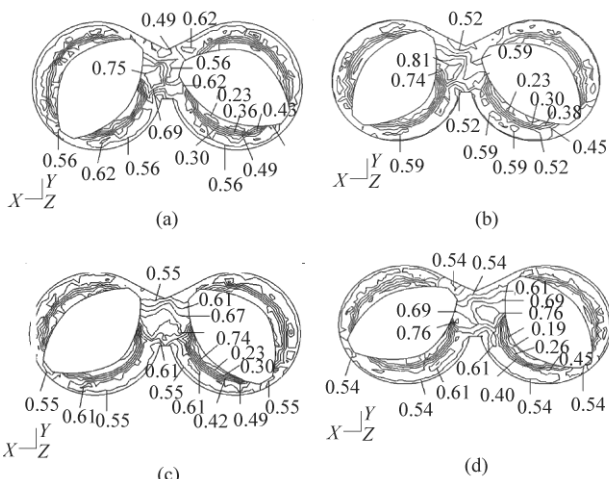
图 3 不同轴向截面的 Z 向速度分布 (m/s)

3.2 流场内混合指数和剪应力的分布

(1) 混合指数的分布

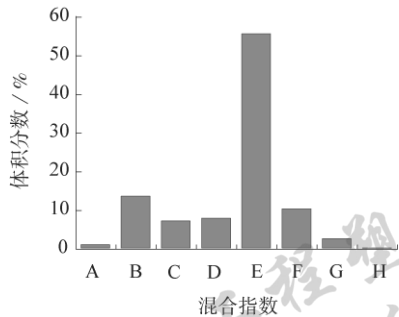
图 4 为距入口不同距离截面上的混合指数分布。图 4 表明, 混合指数的最大值总是出现在两个转子之间, 由于螺棱螺旋角的不同, 最大值区域并不是在转子的正中间, 总是或左或右靠近转子的侧面。转子螺棱的导程各不相同, 旋向相异, 所以转子中间形成的空隙体积有一个从小到大、又从大到小的变化过程。而聚合物熔体是不可压缩的, 当其受到转子的挤压时, 部分物料将会向前或向后运动到空隙较大的区域, 这个挤压流动的过程也是一个拉伸流动的过程, 聚合物熔体伴随着该过程经历了一个拉伸变形。研究表明, 这种拉伸变形对分散混合是非常有利的。随着转子的转动, 转子中间的空隙体积也在变化, 这就使得物料在转子中间被反复拉伸、挤压, 类似于在双辊开炼机上打三角包, 对于聚合物的分散和分布混合操作尤为有利。

图 5 为混合指数的体积分数分布。由图 5 可以



a—Z = 28 mm; b—Z = 32 mm; c—Z = 36 mm; d—Z = 40 mm

图 4 不同轴向截面的混合指数分布



混合指数: A—0.1 ~0.2; B—0.2 ~0.3; C—0.3 ~0.4; D—0.4 ~0.5; E—0.5 ~0.6; F—0.6 ~0.7; G—0.7 ~0.8; H—0.8 ~0.9

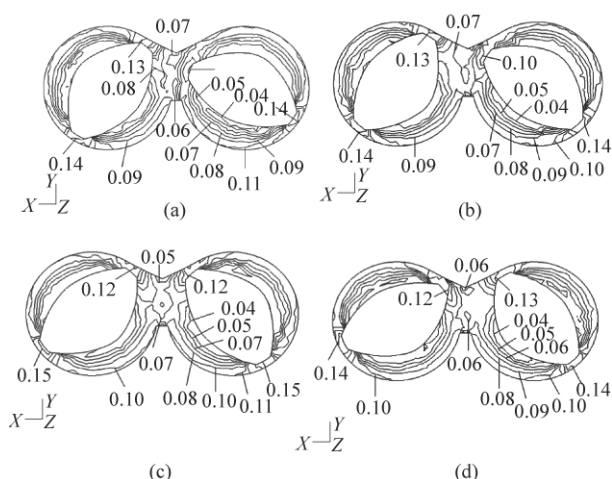
图 5 混合指数的体积分数分布

看出, 流场中 70% 区域的混合指数大于 0.5, 说明在整个混炼段有 70% 的物料都承受着优于简单剪切的剪切或拉伸作用。随着转子的转动, 物料从入口流向出口过程中必然多次经历剪切和拉伸的作用。

(2) 剪应力的分布

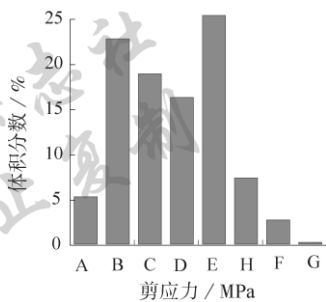
图 6 为不同轴向截面上的剪应力分布。剪应力的等值线围绕着转子呈近似同心圆的层状分布, 越靠近转子的中心, 剪应力越小。在一个截面上左右分别有两个螺棱, 其顶部的剪应力最大, 但随着距入口轴向距离的不同, 其上面分布的剪应力也各不相同。

图 7 为不同剪应力的体积分数分布。从混合的角度出发, 转子的混炼段必须提供足够强大的剪切力场以保证聚合物熔体产生足够的形变和流动, 确保无机物颗粒及其团聚体的混入、破碎和分散。S. P. Rwei 等^[11, 12]通过研究炭黑在聚合物中的分散过程发现, 粒子在聚合物中的分散方式有碎裂和磨蚀两种。碎裂是指团聚体颗粒在外力作用下瞬间破裂成几个小粒子的过程; 磨蚀是指在外力作用下从团



a—Z = 28 mm; b—Z = 32 mm; c—Z = 36 mm; d—Z = 40 mm

图 6 不同轴向截面的剪应力分布 (MPa)



A—0.02 ~0.04 MPa; B—0.04 ~0.06 MPa; C—0.06 ~0.08 MPa; D—0.08 ~0.10 MPa; E—0.10 ~0.12 MPa; F—0.12 ~0.14 MPa; G—0.14 ~0.16 MPa; H—0.16 ~0.18 MPa

图 7 不同剪应力的体积分数分布

聚体母体中逐渐剥落下小颗粒的过程。碎裂一般发生在团聚体团聚强度较弱或作用于团聚体的外力较大时, 而磨蚀发生在团聚体强度较大或作用于团聚体的外力较小时。但这两种分散过程不是完全独立的, 在粒子的分散过程中有可能同时存在这两种分散方式, 只是各自所占比重不同而已。因此流场中维持一定程度的剪应力是必要的, 它会使粒子团聚体发生碎裂或磨蚀, 促进颗粒在聚合物中分散得更均匀。但是, 混合设备提供强大的剪切力时也会使混合物的温度升高, 一些聚合物基体受到高温时则会降解。

从图 7、图 6 可以看出, 剪应力大于 0.1 MPa 的区域约占 38%, 且主要集中在螺棱顶部和料筒的壁面; 颗粒经过这些区域时即发生上述的破裂和磨蚀, 使粒径减小; 剪应力小于 0.04 MPa 的约占 6%, 主要集中在紧贴转子侧面的一层, 其混合能力较差, 不过其区域较小; 剪应力为 0.04 ~0.10 MPa 的区域约占 56%。由此可见, 大部分的剪应力维持在一个中等的水平, 使得在螺棱顶部被破碎的颗粒不会再团

聚,同时也不会造成局部温升太高,造成物料降解。

(3) 转子转过不同角度时混合指数和剪应力的平均值

因为流场的边界条件随着转子的转动而发生改变,因此采用了将转子转过不同角度的几何造型来模拟这一完整的过程。设定每一时间步为 60° ,那么转子旋转一圈共有 6 个几何模型。表 1 列出转子转过不同角度时流场内混合指数、剪切速率、剪应力的平均值。从表 1 可以看到,其混合指数、剪切速率和剪应力随着转子的转动而有稍许变化,这是由于转子的 8 条螺棱的螺旋角不同所致,但这个变化很小,保证了整个混合过程平稳的进行。

表 1 流场内混合指数、剪切速率和剪应力的平均值

转过的角度 / ($^\circ$)	混合指数	剪切速率 / s^{-1}	剪应力 / Pa
0	0.5114	235.84	81 587.11
60	0.5157	233.92	81 179.90
120	0.5146	237.00	80 626.21
180	0.5151	235.65	80 357.51
240	0.5155	233.65	81 152.27
300	0.5146	231.83	80 694.59

3.3 混炼机操作工艺对混合效率的影响

图 8 为加料量与平均混合指数、平均剪应力的关系曲线。从图 8 可以看到,随着加料量的增加,流场内的平均混合指数和剪应力几乎没有变化。这是因为双转子连续混炼机的产量只与加料量有关,不改变其它操作工艺时,增加产量不会改变流场内的平均混合指数和平均剪应力。谢林生等^[13]的研究表明,随着加料量的增加,物料在双转子连续混炼机中的停留时间减小,停留时间分布范围变窄,单位物料所经历的剪应力下降,直接导致混合强度的降低。

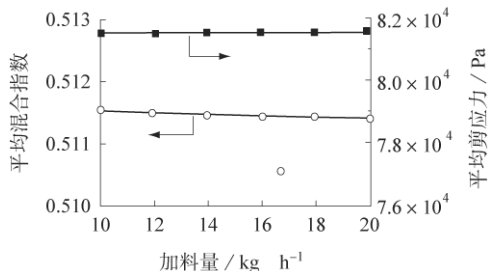


图 8 加料量对平均混合指数和平均剪应力的影响

图 9 为转速与平均混合指数、平均剪应力的关系曲线。从图 9 可以看出,随着转速的增加,平均混合指数稍有下降,而剪应力随着转速的提高而增大。

Z. Tadmor^[14]认为,在剪切力场的作用下,粒子在熔体中的最终尺度与熔体的粘度、团聚体的尺寸及其受到的剪应力密切相关。熔体粘度随着剪切速

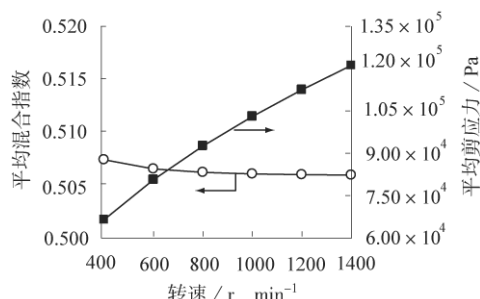


图 9 转速对平均混合指数和平均剪应力的影响

率的增加而下降;随着混合的进行,粒子的粒径逐渐减小,粒子所能获得的分散力也逐渐减弱;当分散力小于破碎团聚体所需的力时,分散过程自然结束。因此可以根据破碎不同的团聚体所要求的剪应力而调整转速,在很宽的范围内调整转速正是双转子连续混炼机的很大优点之一。

图 10 为轴向压力差与平均混合指数和平均剪应力的关系曲线。从图 10 可以看到,随着轴向压力差的增加,混合指数和剪应力随之增加。双转子连续混炼机中轴向压力差的变化是通过调节卸料门的开启度来实现的。当卸料门开启度小时,出口压力很大,轴向压力差较大。实验中发现,平均剪应力和平均混合指数处于最大值时,混炼段的混合强度较高;将卸料门开启度增大,出口压力减小,轴向压力差随之减小,此时混合强度最小。

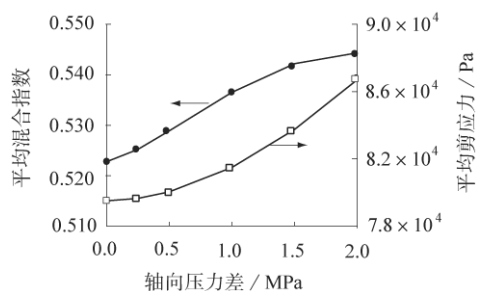


图 10 轴向压力差对平均混合指数和平均剪应力的影响

4 结语

(1) 在两个混炼腔体之间的某些区域,熔体的轴向速度存在负值,表明该区域存在熔体的回流,具有返混的作用。

(2) 拉伸作用主要是在两个转子之间,剪应力的最大值在螺棱顶部。大部分区域的剪应力维持在一个中等的水平,整个混炼段有 70% 的物料都承受着优于简单剪切的混合作用。

(3) 平均混合指数随着轴向压力差的增加而增大,加料量和转速对其影响很小;平均剪应力随着转速和轴向压力差的增加而增大,其中转速对其影响

较大,加料量对平均剪应力没有影响。

(4) 双转子连续混炼机的混合效率很高,并且通过操作参数的变化可以很方便地控制混合强度的大小,其变化范围也极宽。可以说该设备是一种极有发展前途的连续混合设备。

参考文献

- [1] 谢林生, 廖国兵, 陈小洪. 双转子连续混炼机混炼过程和原理研究[J]. 塑料科技, 2001(3): 161-167.
- [2] Manas-Zloczower I, Tadmor Z. Mixing & Compounding of Polymers [M]. New York: Munich Vienna, 1994: 761-830.
- [3] Bang D S, White J L. New model of flow in a farrel continuous mixer[J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(7): 1210-1216.
- [4] Takeshi Ishikawa, Shinichi Kihara, Kazumori Funatsu. 3-D numerical simulation of nonisothermal flow in co-rotating twin screw extruders[J]. Polymer Engineering and Science, 2000, 40(2): 357-364.
- [5] 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量研究(I): 瞬态流场分析[J]. 中国塑料, 2005, 19(3): 90-100.
- [6] 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量研究(II): 混合特性分析[J]. 中国塑料, 2005, 19(6): 103-109.
- [7] Avalosse T, Rubin Y, Fondin L. Non-isothermal modeling of co-rotating and contra-rotating twin screw extruders[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2002, 21(5): 419-429.
- [8] Manas-Zloczower I, Haur-Hong Y. Flow field analysis of the kneading disc region in a co-rotating twin screw extruder[J]. Polymer Engineering and Science, 1992, 32(19): 1411-1417.
- [9] Cheng Hongfei, Manas-Zloczower I. Study of mixing efficiency in kneading discs of co-rotating twin-screw extruders[J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(6): 1082-1090.
- [10] Chin-hsiang Yao, Manas-Zloczower I. Influence of design on dispersive mixing performance in an axial continuous mixer—LC-MAX 40[J]. Polymer Engineering and Science, 1998, 38(6): 936-946.
- [11] Rwei S P, Manas-Zloczower I, Feke D L. Observation of carbon black agglomerate dispersion in simple shear flows[J]. Polymer Engineering and Science, 1990, 30(2): 701-706.
- [12] Rwei S P, Manas-Zloczower I, Feke D L. Characterization of agglomerate dispersion by erosion in simple shear flows[J]. Polymer Engineering and Science, 1991, 31(8): 558-562.
- [13] 谢林生, 李培宁, 黄宇新, 等. 双转子连续混炼机停留时间的测定[J]. 塑料工业, 2003, 31(12): 22-27.
- [14] Tadmor Z, Gogos G 著. 聚合物加工原理[M]. 耿孝正, 等译. 北京: 化学工业出版社, 1990: 488-493.

STUDY OF DISPERSIVE MIXING EFFICIENCY IN MIXING SECTION OF TWO-ROTOR CONTINUOUS MIXER

Liu Xiaoming, Xie Linsheng, Ma Yulu

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Cao Wenfeng

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

ABSTRACT A fluid dynamics analysis software Polyflow using the finite element method was adopted to simulate the 3-D isothermal flow in mixing section of self-made two-rotor continuous mixer—ECM30. The flow field characteristics relevant for dispersing mixing were shear stress and mixing index. The influence of processing parameters on the dispersive mixing efficiency were discussed. The simulation results could provide a theoretic guidance for polymer processing.

KEYWORDS two-rotor continuous mixer, mixing section, numeric simulation, 3-D isothermal flow, mixing efficiency

《工程塑料应用》杂志开设“技术转让与合作”、“企业风采”栏目

为做好广大作者、读者单位最新科研成果及新产品、新技术的推广服务,《工程塑料应用》杂志和“工程塑料网”(www.epa1973.com)网站已开设“技术转让与合作”栏目,以方便买卖双方的有效交流与沟通。栏目内容可涉及科研成果及专利技术的转让,公司新产品、新技术简介等方面。

另外,为了全方位宣传塑料行业精英企事业单位形象,《工程塑料应用》杂志增设“企业风采”栏目。报道内容主要是企业发展历史、企业文化、企业管理、研发创新能力、新产品发布、攻关项目介绍,人物专访等。来稿字数控制在5000字以内,可以附带图片。

《工程塑料应用》为中文核心期刊,是中国工程塑料工业协会会刊,国内外公开发行,屡获国家期刊奖,是中国塑料行业的权威媒体,知名度高,发行量大。可确保您发布的信息有足够的浏览量。

欢迎各有关企事业单位踊跃投稿!投稿时请提供所发布信息的真实性证明,并加盖单位公章。具体刊登事宜请与编辑部直接联系。

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