

微孔泡沫塑料的研究综述

刘 涛 罗世凯 王先忠

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 绵阳 621900)

摘要 介绍微孔泡沫塑料的制备方法和表征方法, 重点阐述具有工业化前景的过饱和气体制备方法的原理及制备中的影响因素。并分别探讨间歇法和连续挤出成型法的成核机理和泡孔生长控制。对微孔泡沫塑料的未来发展进行了展望。

关键词 微孔泡沫塑料 超临界 CO_2 成核机理 泡孔生长

泡沫塑料具有质轻、隔热、吸收冲击能量等特性, 被广泛应用于包装、建筑、运输等领域^[1]。近 20 年来, 国内外泡沫塑料工业的发展很快, 泡沫塑料新品种和新的成型方法也在不断出现^[2-3]。自 20 世纪 80 年代以来, 一种新型的泡沫塑料即微孔泡沫塑料越来越受到关注。微孔泡沫塑料的泡孔尺寸只有普通泡沫塑料(一般为 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$) 的 $1/100 \sim 1/10$, 并且泡孔密度相对较大, 约为 $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{15} \text{个}/\text{cm}^3$ 。

微孔泡沫塑料是由 J. E. Martini^[4] 在 1981 年首先研制成功, 他认为由于微孔泡沫塑料的泡孔极小且分布均匀, 使聚合物中的微隙圆孔化, 泡孔实际起到了一种类似橡胶颗粒增韧的作用, 这些微小的泡孔通过钝化裂纹尖端, 增加传播裂纹所需要的能量来阻止裂纹的扩展。从目前的文献报道来看, 微孔泡沫塑料的许多力学性能明显优于普通泡沫塑料和未发泡的材料。例如微孔泡沫塑料的冲击强度可比发泡前提高 5 倍以上, 比刚度可提高 5 ~ 7 倍。此外, 与普通泡沫塑料相比, 微孔泡沫塑料还具有更好的热稳定性, 更低的介电常数和热传导性^[5]。所以, 这种微孔泡沫塑料不仅在复合材料及其结构的制造中可以取代普通泡沫塑料, 甚至在某些情况下可以替代实体塑料。因此, 微孔泡沫塑料被认为是 21 世纪的新型材料。

微孔泡沫塑料可用作包装材料、隔音材料等, 开孔结构的微孔材料则适合用作分离、吸附材料, 催化剂担体, 药物缓释材料等^[6-7]。此外由于微孔泡沫塑料的泡孔极小, 还适合用来制作只有 $1 \sim 2 \text{mm}$ 厚的发泡器件, 这种器件若用普通发泡方法制作, 则会引起泡孔塌陷。传统发泡工艺难以对聚苯硫醚、聚砜、聚醚酰亚胺、聚酰亚胺等耐高温材料进行发泡, 而运用微孔发泡技术则可以制备出此类材料的微孔泡沫塑料。同时, 利用 Mucell 微孔发泡技术与 Ono Sangyo 公司的快速加热加工技术可制得具有较高表面质量的微孔泡沫制品^[8]。笔者现对微孔泡沫塑料的制备方法、表征方法及微孔塑料泡孔尺寸的控制技术等进行了综述。

1 微孔泡沫塑料的制备方法

目前制备微孔泡沫塑料的方法主要有热引导相分离法、单体聚合、超临界流体沉析法和过饱和气体法等 4 种。

1.1 热引导相分离法

这是较早出现的一种制备开孔结构微孔泡沫塑料的方

法, 首先将聚合物溶于一定溶剂(如环己烷)中, 升高温度使溶液体系呈均相, 再迅速降温使体系分相, 从而得到具有微孔结构的聚合物, 最后通过升华干燥或超临界萃取的方法将溶剂与聚合物分离^[9]。这种制备方法存在一定的缺陷, 即在温度骤降过程中存在的温度梯度及溶剂分离时产生的表面张力都易引起泡孔塌陷而破坏微孔结构^[10]。

1.2 单体聚合

单体聚合是利用微乳液的热力学稳定性和有序的微结构, 将聚合单体分散在微乳液中进行聚合得到微孔泡沫材料。W. E. P. Raj 等^[11] 在由甲基丙烯酸甲酯(MMA)、丙烯酸(AA)、水、十二烷基磺酸钠组成的微乳液中, 用 2, 2-二甲氧基-2-苯基-苯乙酮(DMPA)引发聚合得到微孔直径为 $1 \sim 4 \mu\text{m}$ 的聚合物。这种制备方法的缺陷在于聚合过程中体系中各组分间存在的静电作用和位阻效应会破坏体系的微乳液状态, 引起相分离, 最终破坏微孔结构。其解决方法为适当加快聚合速率, 使反应在发生相分离前完成。

1.3 超临界流体沉析法

处于临界温度(T_c)和临界压力(P_c)以上的流体称为超临界流体。超临界流体没有明显的气液分界面, 它既非气态又非液态, 是一种气液不分的状态, 但其兼具二者的优点, 既像气体一样容易扩散, 又像液体一样有很强的溶解能力, 而且其粘度、溶解能力等与密度相关的性能都可通过调节压力来控制^[12-13]。超临界流体沉析法是以超临界流体作为反溶剂, 将聚合物溶液通过毛细管喷入超临界流体中, 使聚合物干燥和玻璃化, 经高速扩散和强烈雾化使体系产生相分离而形成带有微孔的颗粒。1993 年 D. J. Dixon 等^[14] 应用该技术成功制备了聚苯乙烯(PS)微孔泡沫塑料。其方法是: 先将 PS 溶于有机溶剂中, 该溶剂必须与超临界 CO_2 (SC- CO_2) 相容(如甲苯等), 再将该溶剂喷入盛有 SC- CO_2 的容器内, 当溶剂与 SC- CO_2 接触时, 由于溶剂对 SC- CO_2 的吸收而使其体积稀释膨胀, 从而改变溶剂和溶质 PS 间的作用力, 降低溶剂的溶解能力, 使 PS 过饱和而沉析出微孔颗粒。最后经过过滤或由 SC- CO_2 携带出溶剂。研究表明, 通过控制压力、温度、溶液初始浓度及溶剂引入速率等条件, 可以控制过饱

和度的变化,从而方便地控制成核速率及微孔尺寸。但该方法只能用于制备微孔颗粒,无法制备微孔泡沫塑料制品。

1.4 过饱和气体法

过饱和气体法是目前最常用的方法,其基本原理是:将聚合物在高压(6~30 MPa)下被惰性气体所饱和,形成聚合物/气体均相体系,再通过控制温度和压力来降低气体在聚合物中的溶解度,产生过饱和态,然后使聚合物发泡。

1.4.1 间歇法(固态聚合物/气体均相体系)

美国麻省理工学院的 J. E. Martini 提出了间歇法的原始构想。后来由 J. S. Colton 等进行了多方面的改进。其操作方法是:在压力容器中使聚合物在低于玻璃化转变温度(T_g)下被高压气体所饱和,然后释放压力,产生过饱和态,再升高温度使材料发泡^[15-17]。

对于间歇法制备微孔泡沫塑料而言,须考察气体在固态聚合物中的扩散系数,以及气体对固态聚合物 T_g 的影响。由于气体在固态聚合物中的扩散系数极小(如室温下 CO_2 在绝大多数热塑性聚合物中的扩散系数仅为 $5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 左右),扩散进入聚合物中的气体要达到饱和状态需要很长时间。近几年,一个重大的改进是采用超临界流体技术。表 1 列出几种超临界流体的临界温度和临界压力。但是对于固态聚合物,尽管采用了超临界流体技术,其饱和时间还是太长(在 43°C 和 20.5 MPa 下,超临界 CO_2 在 1.6 mm 厚的低密度聚乙烯(LDPE)和硬质聚氯乙烯(PVC-U)中达到饱和所需的时间分别为 10 h 和 15 h 左右)。因此该方法很难实现连续生产。间歇法微孔发泡装置示意图见图 1。当气体进入聚合物基体后,采用差示扫描量热(DSC)仪和动态力学分析(DMA)仪这类设备无法有效地测试固态聚合物/气态混合物的 T_g 。Y. D. Hwang 等^[18] 利用弹性模量的变化推导出固态聚合物/气体混合物的 T_g 。J. D. Yoon 等^[19] 构建了预测固态聚合物/气体混合物 T_g 的 Cha-Yoon 模型,他们发现固态聚合物/气体混合物的 T_g 随气体含量的增加而降低,如果进入聚合物基体中的气体足够多,固态聚合物/气体混合物的 T_g 能降到室温,这使得在室温下加工成型成为可能。

表 1 几种常见超临界流体的临界温度和临界压力

超临界流体	临界温度/ $^\circ\text{C}$	临界压力/MPa	临界密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
CO_2	31.1	7.38	468
N_2	-147.0	3.37	
C_2H_6	32.2	4.88	203
NH_3	132.3	11.35	235
C_2H_4	9.1	5.04	214
CH_3OH	239.4	8.09	272
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	240.7	6.14	276
H_2O	373.9	22.06	322

1.4.2 连续挤出成型法(聚合物熔体/气体均相体系)

将气体 CO_2 (或 N_2) 由高压泵增压后经计量装置连续定量地注入挤出机内的聚合物熔体中,通过混合和扩散均化使气体完全溶入聚合物熔体中得到聚合物熔体/气体均相体系^[20-22]。热塑性塑料一般难以制得具有高开孔率结构的泡

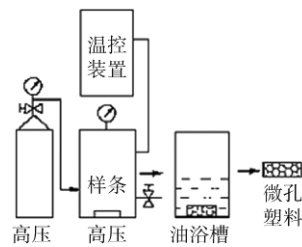


图 1 间歇法微孔发泡装置示意图

沫塑料, P. C. Lee 等^[23] 利用连续挤出成型技术制得了具有高开孔率结构(开孔率接近 99%)、高泡孔密度(3.5×10^{10} 个/ cm^3)的 LDPE 微孔片材。Zhang H 等^[24] 利用连续挤出成型技术改善了微孔泡沫塑料因使用木质纤维增强而牺牲韧性的缺点。

对于连续挤出成型法制备微孔泡沫塑料而言,须考察聚合物熔体/气体均相体系的形成时间、气体对聚合物粘度的影响和熔体流动速率(MFR)对泡孔结构的影响等。在连续挤出成型法制备微孔泡沫塑料过程中,为了缩短聚合物熔体/气体均相体系的形成时间,可以采用 3 种方法:①使用超临界流体作为发泡剂;②适当提高温度以提高气体在聚合物中的扩散系数,例如在 200°C 时, CO_2 在热塑性塑料中的扩散系数是 $5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$, 比其在室温下的扩散系数($5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)提高了两个数量级;③增强对流扩散,增加混合程度,使得更多的熔体有机会与气体接触。当聚合物熔体/气体均相体系形成后,再使熔体通过特殊的成核口模(毛细管口模),快速降低体系压力,使体系进入过饱和态,引发气泡核的形成。最后通过降低成型口模温度来抑制泡孔增大,得到微孔泡沫塑料。图 2、图 3 分别为微孔发泡连续挤出成型装置和口模的示意图^[20-21]。

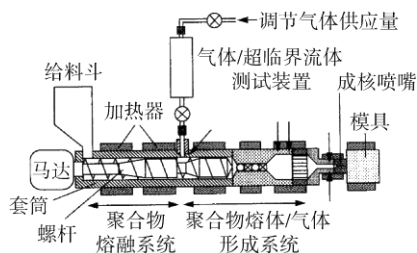


图 2 微孔泡沫塑料连续挤出成型系统结构图

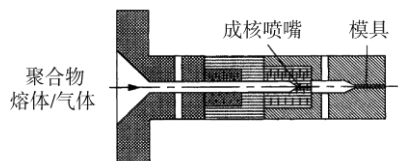


图 3 口模和喷嘴结构图

在气体对聚合物粘度的影响研究中, T. H. Chong 等^[25] 发现,随进入聚合物熔体气体含量的增加,聚合物的粘度减小。同时,他们还建立了一套新的模型用于估算聚合物熔体/气体均相体系的粘度变化。在 MFR 对泡孔结构的影响研究中, P. Rachtanapun 等^[26] 发现,聚合物的 MFR 越高,熔体

强度越小, 聚合物就越难以维持泡孔结构, 从而导致泡孔塌陷。因此对于高 MFR 的聚合物, 须通过降低发泡温度和发泡时间来维持高孔隙度。

2 微孔泡沫塑料的表征方法

众所周知, 微孔泡沫塑料的力学性能是与其制备工艺和微孔结构参数密切相关的, 而微孔结构的特征主要由孔隙度、泡孔尺寸和形状及泡孔的取向和分布等参数来决定。为了表征微孔泡沫塑料的微结构参数, 一般采用扫描电子显微镜 (SEM) 分析的方法^[27]。孔隙度 V_f 和单位原始聚合物体积的泡孔密度 N_0 可由式 (1)、式 (2) 计算:

$$V_f = 1 - \rho / \rho \quad (1)$$

$$N_0 = (nM^2/A)^{1/2} / (1 - V_f) \quad (2)$$

式中: ρ 、 ρ ——聚合物基体、泡沫塑料的密度;

n ——SEM 照片中的泡孔数;

A 、 M ——SEM 照片的面积、放大倍数。

ρ 、 ρ 按 ASTM D 792 - 1991 测试, 使用 Archimedian 水位移技术确定:

$$\rho = 0.9975 M_a / M_w \quad (3)$$

$$\rho = 0.9975 M_{af} / M_{wf} \quad (4)$$

式中: M_a 、 M_w ——分别是基体在空气和蒸馏水中的质量;

M_{af} 、 M_{wf} ——分别是泡沫塑料在空气和蒸馏水中的质量。

此外, 单位原始聚合物体积的泡孔密度 N_0 和单位体积泡孔密度 N_v 之间存在如下关系:

$$N_v = (1 - V_f) / N_0 \quad (5)$$

其中 N_v 与泡孔直径 D 和孔隙度 V_f 有关, 即有:

$$N_v \pi D^3 / 6 = V_f \quad (6)$$

根据上面公式, 可得到 D 、 N_0 和 V_f (或相对密度 ρ / ρ) 之间的如下关系:

$$N_0 \pi D^3 / 6 = V_f / (1 - V_f) = (1 - \rho / \rho) / (\rho / \rho) \quad (7)$$

通过对微孔泡沫塑料形貌的分析, 可建立材料制备的工艺参数和微结构参数之间的关系^[28]; 若对制得的材料进行宏观实验便可建立材料力学性能与微结构参数的关系。因此, 微孔泡沫塑料的表征和形貌分析为研究这类材料的力学行为提供了一定的实验和理论基础, 并在微孔泡沫塑料的力学性能和工艺参数间架起了一座桥梁。

3 微孔泡沫塑料的成核、泡孔长大控制

泡沫塑料的成型主要有两种成核形式: 一种是体系自发生成泡核, 称为均相成核; 另一种是由于外来杂质诱导的成核, 称为非均相成核。对于微孔泡沫塑料成型来说, 均相成核较非均相成核更有利于提高成核速率, 且成核点的数目多, 分布均匀, 其成核速率取决于气体分子在聚合物中的浓度。如果聚合物/气体均相体系中出现第三相粒子, 将会影响均相成核的顺利进行, 导致较大泡核的产生且分布不均匀。这是因为非均相成核所需的活化能小, 非均相成核会先于均相成核, 因此泡核会优先在这些第三相粒子上形成。虽然目前尚未完全弄清成核机理, 但此领域的许多工作已得到

很好的开展。M. R. Holl 等^[29]研究间歇法发泡成核机理时发现, 泡孔的初始形成并非圆形, 泡孔的成核是源于基体内部断裂过程的结果。在断裂过程中, 裂痕是随机出现的, 且裂痕的长度不超过 3 μm 。当聚合物/气体混合物被加热到影响 T_g 时, 开始成核。就间歇法而言, 成核的本质是基体三维拉伸破坏过程。M. R. Holl 等^[30]还根据聚碳酸酯 (PC) / CO_2 体系建立了稳定的固态质量平衡模型。此模型用于揭示间歇法微孔发泡中自行控制泡孔生长的机理。用经典的均相成核理论已能定性或半定量地对发泡过程进行阐述^[31-34]。均相成核速率 N 的计算公式如式 (8) 所示:

$$N = C_0 f_0 \exp(-\Delta G_{\text{hom}}^* / kT) \quad (8)$$

式中: C_0 ——聚合物中气体分子的浓度;

f_0 ——参与成核的气体分子频率因子;

k ——波尔兹曼常数;

T ——温度;

ΔG_{hom}^* ——均相吉布斯自由能, 由式 (9) 计算得到:

$$\Delta G_{\text{hom}}^* = 16 \pi \gamma^3 / (3 \Delta P^2) \quad (9)$$

其中, γ 为泡孔界面的表面能; ΔP 为泡孔内外的压力差。

但经典成核理论是建立在静态热力学不平衡过程上的, 而连续挤出成型法是动态热力学不平衡过程, 因而经典成核理论在预测连续挤出成型法中的泡孔成核和泡孔结构上有其局限性。由于连续挤出成型过程中影响成核的因素很多, 国内外学者对各影响因素开展了广泛的研究。M. C. Guo 等^[35]研究发现, 连续挤出成型过程中, 剪切作用对泡孔成核有着重要的影响, 剪切作用是泡孔成核的主要驱动力, 而非传统意义上仅仅是促使聚合物熔体和气体间形成过饱和状态。Han Xiangmin 等^[22]研究发现, Sanchez-Lacombe 方程能够计算 CO_2 在聚合物熔体中的溶解度, 且 CO_2 含量对成核时间和泡孔生长时间有较大的影响。Xu Xiang 等^[36]研究发现, 模具的几何结构对成核有较大的影响。模具的几何结构主要是对挤出端压力降速率和模具的压力造成影响, 从而影响成核和泡孔形貌。V. Kumer 等^[37]在研制 PC/ CO_2 体系微孔泡沫塑料时发现, 气体的压力释放时间越短, 越有利于形成大量细密的泡孔结构。N. S. Ramesh 等^[38]在研制 PS/ CO_2 体系微孔泡沫塑料时发现, 升温时间越快, 越有利于形成大量细密的泡孔结构。

成核以后的发泡过程是使泡核进一步长大, 并加以冷却固化定型。当气体分子从聚合物中扩散进入已成核的泡核时, 泡核长大。泡核长大的速率与气体分子的扩散速率和聚合物/气体混合物的熔体强度有关。如熔体的刚性较大, 泡核长大就很慢。C. B. Park 等^[39]在研究聚丙烯 (PP) 微孔泡沫塑料的连续挤出成型时发现, 支链 PP 的成核密度略小于线性 PP 的成核密度, 但线性 PP 中的泡孔合并现象较多。这是由于线性 PP 的熔体强度低于支链 PP, 其包裹气泡的能力较低, 使得气泡更容易合并, 从而使得泡孔密度降低。

总之, 影响气泡长大的因素大致可分为两大类: 一类是体系的物性参数, 如气体的浓度、扩散系数、熔体的粘弹性

等,它们主要通过界面间的物理传递来影响气泡的长大;另一类是加工工艺参数,如压力、温度、剪切速率等,这一类参数主要通过热力学性能来影响气泡的长大^[27]。

体系各参数对气泡长大的影响为:①熔体粘度,粘度越大阻力越大,气泡的长大速度越慢,尤其在气泡长大的初始阶段;②熔体弹性,弹性的影响表现出双重性,增大熔体的弹性有利于减小熔体的阻力,气泡的长大速度增大,但熔体弹性越大,熔体储存的弹性能也越大,弹性能作用在气泡界面上的应力阻止气泡长大;③气体的种类,气体的物理性质不同,影响到气泡的长大速率;④气泡界面的张力,界面张力阻止气泡的长大,但如果界面张力过小,则会导致气体逃逸量的增加、气泡塌陷及泡孔连通,⑤温度,温度主要是通过影响气体的扩散系数和溶解度参数及熔体参数来影响气泡的长大,对于溶解热为负的气体来说,提高温度有利于增加气泡的长大速率;⑥压力,压力越大,泡核的密度越大,使得单个气泡的最终尺寸越小,同时高压可以抑制气泡的长大。

4 结语

微孔泡沫塑料作为性能优异的新型材料,在取得巨大进展的同时,仍还有很多问题值得研究。笔者认为近期需要开展的工作主要有:

(1) 连续挤出成型微孔发泡技术通常不能生产出 A 级光滑表面的微孔泡沫塑料。如何提高微孔泡沫塑料制品的表面质量是当前急需解决的难题。

(2) 目前微孔塑料挤出成型所生产的产品主要是一些厚度较小的片材,用微孔塑料挤出成型生产厚的产品如管材、棒材等还有待进一步研究。

(3) 在对泡孔长大的研究中,许多不可忽略的影响因素都没有纳入目前的控制方程中去,例如熔体剪切场对气泡物理形态的影响;剪切所引起的气泡熔膜界面的更新对气体传递的影响;表征熔体粘弹性的本构方程的选用及高温、高压下处于临界状态的发泡剂的物理性质等。由于影响泡孔长大的因素很多,所以这是一项艰巨的工作。

(4) 除理论探索预测微孔泡沫塑料的模量和强度外,模拟它们的本构关系、断裂、疲劳和蠕变等力学行为对工程应用也是至关重要的。

(5) 为了建立更为合理的微孔泡沫塑料的力学模型,必须对这类材料进行更多的宏观、微观力学实验,正确认识这类材料的形变和失效规律。

参考文献

[1] 吴舜英,等. 泡沫塑料成型[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
 [2] 牟文杰,等. 塑料, 2001, 30: 33 - 36.
 [3] Dai X H, et al. Journal of Supercritical Fluid, 2005, 33: 259 - 267.
 [4] Martini J E. The production and analysis of microcellular foam [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1981.
 [5] Baldwin D F, et al. Polymer Engineering and Science, 1996, 36: 1 437 - 1 445.
 [6] Lakhwant S, et al. Biomaterials, 2004, 25: 2 611 - 2 617.

[7] 凯尔文 T, 等. 微孔塑料成型技术[M]. 张玉霞译. 北京: 化学工业出版社, 2004.
 [8] 杨中文, 等. 国外塑料, 2006, 24: 61 - 63.
 [9] Aubert J H, et al. Polymer, 1985, 26: 2 047 - 2 054.
 [10] Goel S K, et al. Polymer Engineering and Science, 1994, 34 (14): 1 137 - 1 147.
 [11] Raj W E P, et al. Journal of Applied Polymer Science, 1993, 47: 499 - 511.
 [12] 蔡建国, 等. 化工进展, 1996 (6): 53 - 59.
 [13] 胡红旗, 等. 化学通报, 1997 (12): 20 - 26.
 [14] Dixon D J, et al. A I Ch E Journal, 1993, 39 (1): 127 - 139.
 [15] Wang Jin, et al. Polymer, 2001, 42: 8 265 - 8 275.
 [16] Kyung N L, et al. Polymer International, 2000, 49: 712 - 718.
 [17] Kwon Y K, et al. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, 24 (1): 127 - 132.
 [18] Hwang Y D, et al. Polymer Testing, 2002, 21: 269 - 275.
 [19] Yoon J D, et al. Polymer Testing, 2001, 20: 287 - 293.
 [20] Baldwin D F, et al. Polymer Engineering and Science, 1996, 36: 1 425 - 1 435.
 [21] Baldwin D F, et al. Polymer Engineering and Science, 1998, 38: 674 - 688.
 [22] Han Xiangmin, et al. Polymer Engineering and Science, 2002, 42: 2 094 - 2 106.
 [23] Lee P C, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102: 3 376 - 3 384.
 [24] Zhang H, et al. Advances in Polymer Technology, 2004, 23 (4): 263 - 276.
 [25] Chong T Y, et al. Polymer Engineering and Science, 2003, 43 (6): 1 337 - 1 344.
 [26] Rachtanapun P, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 93: 364 - 371.
 [27] Matuana L M, et al. Cellular Polymers, 1998, 17 (1): 1 - 16.
 [28] Saeed D, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90: 1 412 - 1 420.
 [29] Holl M R, et al. Journal of Materials Science, 1999, 34: 637 - 644.
 [30] Holl M R, et al. Journal of Polymer Science (Part B): Polymer Physics, 2001, 39: 868 - 880.
 [31] Han X M, et al. Polymer Engineering and Science, 2003, 43: 1 206 - 1 220.
 [32] Colton J S, et al. Polymer Engineering and Science, 1987, 27: 485 - 492.
 [33] Colton J S, et al. Polymer Engineering and Science, 1987, 27: 493 - 499.
 [34] Colton J S, et al. Polymer Engineering and Science, 1987, 27: 500 - 503.
 [35] Guo M C, et al. Polymer Testing, 2003 (22): 705 - 709.
 [36] Xu Xiang, et al. Polymer Engineering and Science, 2003, 43 (7): 1 378 - 1 390.
 [37] Kumar V, et al. Polymer Engineering and Science, 1990, 30: 1 323 - 1 329.

[38] Ramesh N S, et al. Polymer Engineering and Science, 1991, 31: 1 657 - 1 664.

[39] Park C B, et al. Polymer Engineering and Science, 1997, 37: 1 - 10.

OVERVIEW ON THE RESEARCH OF MICROCELLULAR FOAMS

Liu Tao, Luo Shikai, Wang Xianzhong

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT The preparation and characterization methods of microcellular foams were introduced. The major represent was put on the preparation principle and influencing factors of saturation air method with prospect of industrialization. The nucleation mechanism and growth control of the cell in batch-type and continuous extrusion were discussed respectively. Finally, the future development prospects of microcellular foams were forecasted.

KEYWORDS microcellular foam, supercritical CO₂, nucleation mechanism, cell growth

欢迎订阅 2008 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘, 请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊, 是中国工程塑料工业协会会刊, 荣获首届、第二届、第三届国家期刊奖等 23 项国家、省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘(CA) 千种表。2008 年定价 10.0 元/期, 全年 120 元。1986 年以来的期刊价目见表 1。欢迎读者来函(附名片) 免费索取样刊。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版。本刊荣获 5 项省部级优秀期刊奖, 被美国化学文摘(CA) 收录。2008 年定价 10.0 元/期, 全年 60 元。创刊号以来的期刊价目见表 2。欢迎读者来函(附名片) 免费索取样刊。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 我社已将《工程塑料应用》自创刊号(1973 年) 至 2007 年底共 35 卷 218 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售; 同时也将《化学分析计量》自创刊号(1992 年) 至 2007 年底共 16 卷 59 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售。分别利用这两种合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文, 又可根据读者自定义的关键词进行全文检索, 非常方便、实用。

《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 500 元; 《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 150 元。

邮局汇款:

收款单位: 山东省济南市 108 信箱杂志社
邮编: 250031 传真: (0531) 85947355 85878224
电话: (0531) 85878057 85878223 85878278

银行汇款:

户 名: 中国兵器工业集团第五三研究所
开户银行: 济南市工商银行经十一路支行
帐 号: 1602001229014425546

表 1 《工程塑料应用》单册期刊、合订本价格表

年 份	期 数	每册单价 / 元	全年定价 / 元	合订本 / 元
1986 ~1989	16	0.825	13.2	19
1990 ~1992	12	1.4	16.8	23
1993、1994	10	2.4	24	30
1995	6	2.8	16.8	23
1996	6	3	18	24
1997	6	3.5	21	27
1998	12	3.5	42	48
1999	12	4	48	54
2000	12	5	60	66
2001	12	5.5	66	78(两本)
2002	12	6	72	84(两本)
2003	12	6.5	78	90(两本)
2004	12	7	84	96(两本)
2005	12	7.5	90	102(两本)
2006	13	8	104	116(两本)
2007	12	9	108	120(两本)
2008	12	10	120	132(两本)
合 计	189		800(优惠)	900(优惠)

表 2 《化学分析计量》单册期刊、合订本价格表

年 份	期 数	每册单价 / 元	全年定价 / 元	合订本 / 元
创刊号 ~1998	9	3	27	33
1999	4	3.5	14	60
2000	4	4	16	
2001	6	4	24	
2002	6	5	30	72
2003	6	6	36	
2004	6	7	42	93
2005	6	7.5	45	
2006	6	8	48	108
2007	6	9	54	
2008	6	10	60	60(单册)
合 计	65		350(优惠)	380(优惠)