

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.11.011

微孔发泡注塑成型工艺泡孔尺寸影响因素分析

江青松, 柳和生

(东华理工大学机械与电子工程学院, 南昌 330013)

摘要: 基于泡孔长大的细胞模型, 以中心浇口矩形平板为研究对象, 采用有限元方法对微孔发泡注塑成型工艺进行数值模拟, 研究主要参数对平均泡孔半径的影响规律, 并分析其产生的机理, 结果表明, 随着注射时间和熔体预注射量的增加, 平均泡孔半径逐渐减小; 随着熔体温度和模具温度的升高, 平均泡孔半径逐渐增大, 但模具温度比熔体温度的影响小得多; 随着超临界流体 (SCF) 质量分数和初始泡孔半径的增加, 平均泡孔半径开始变化较小, 后减小较显著; 随着初始泡核浓度的增加, 平均泡孔半径呈现下降先快后慢的趋势。

关键词: 微孔发泡; 超临界流体; 注塑成型; 工艺参数; 泡孔半径; 数值模拟

中图分类号: TQ320.66+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)11-0055-04

Analysis of Influencing Factors on Cell Size in Microcellular Injection Molding Process

Jiang Qingsong, Liu Hesheng

(School of Mechanical & Electronic Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract : Based on the cell model of microcellular growth, a center-gated rectangular plate was used to numerically simulate the flow in the microcellular foaming injection molding process by using finite element method. The results show that with the increase of injection time and melt injection volume, the average cell radius gradually decreases. With the increase of melt temperature and mold temperature, the average cell radius gradually increases, but the influence of mold temperature is much less than that of melt temperature. With the increase of supercritical fluid (SCF) mass fraction and initial cell radius, the average cell radius starts to change less, and then decreases significantly. With the increase of initial cell nucleus concentration, the average cell radius appears to be the trend of rapid decline firstly and then slow decline.

Keywords : microcellular foaming ; supercritical fluid ; injection molding ; process parameter ; cell radius ; numerical simulation

微孔发泡注塑成型工艺将超临界流体 (SCF) 状态的 N_2 或 CO_2 与聚合物熔体混合, 然后注射充填部分模腔, 模腔余下部分的充填则依靠 SCF 成核效应, 以及并发的泡孔长大过程来实现, 该工艺没有传统注塑成型工艺的保压过程, 可减少材料用量、降低能源消耗、缩短成型周期、改善注塑成型热力学、强化材料性能等优势, 已被广泛应用于建材、家电、汽车、航空、航天等领域^[1-4]。

微孔发泡注塑成型工艺实质是 SCF 技术在注塑成型加工中的应用, 其原理是利用过饱和 SCF / 聚合物熔体混合体系的热力学不稳定性, 通过控制混合体系的温度和压力, 使聚合物熔体内形成大量

的 SCF 介质泡孔结构, SCF 在聚合物熔体中溶解、成核、长大、定型, 最终形成泡孔, 泡孔结构由泡孔长大过程决定^[5]。微孔发泡注塑成型流动过程中, 由于流场中的温度和压力不均匀, 不同位置的泡孔长大过程存在差异, 导致成型制品中不同位置的泡孔结构不尽相同, 使泡孔尺寸呈现一定的分布, 并最终影响成型制品的力学性能, 合理的泡孔结构及尺寸有利于提高材料的力学性能^[6-7]。因此, 如何通过工艺参数的调整, 保持合理的泡孔尺寸, 以获得理想力学性能的成型制品, 是应用微孔发泡注塑成型工艺的关键^[8]。

基于数值模拟技术, 采用泡孔长大细胞模型^[9],

基金项目: 东华理工大学博士基金 (DHBK2019172)

通信作者: 江青松, 博士, 讲师, 主要从事高分子成型加工研究 E-mail : qsjiang@ecut.edu.cn

收稿日期: 2020-09-01

引用格式: 江青松, 柳和生. 微孔发泡注塑成型工艺泡孔尺寸影响因素分析 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(11):55-58, 90.

Jiang Qingsong, Liu Hesheng. Three-dimensional numerical simulation on the fiber length distribution in injection molding of long fiber reinforced polymer[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11):55-58, 90.

研究微孔发泡注塑成型工艺泡孔尺寸的影响因素,着重分析和探讨主要参数对泡孔尺寸的影响机理,为微孔发泡注塑成型工艺实践提供理论指导。

1 泡孔长大模型

为了计算泡孔长大过程,可采用 Amon 和 Denson 提出的细胞模型,泡孔长大受流体动力学与气体扩散控制。

根据 SCF 与熔体界面处的力平衡条件,可得到泡孔半径变化率 $\frac{dR}{dt}$ 可描述为^[10]:

$$4\eta R/R = (P_g - P) - 2\sigma/R \quad (1)$$

式中, η 为熔体黏度; P_g 为泡孔内压力; σ 为 SCF 与熔体界面处表面张力; P 为泡孔与熔体界面处的压力。

上式中泡孔内压力随泡孔半径的变化关系,可根据浓度梯度驱动熔体内气体向泡孔中扩散的质量守恒求出,由 Fick 扩散定律控制^[11]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v r \frac{\partial c}{\partial r} = D \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right) \right] \quad (2)$$

式中, D 为扩散系数; c 为 SCF 质量分数。

根据 Henry 定律,泡孔壁处的 SCF 质量分数 c_w 与泡孔内压力的关系可写成^[10]:

$$c_w(t) = c(R, t) = HP_g(t) \quad (3)$$

式中, H 为亨利定律常数。

假设气体服从理想气体状态方程,则有:

$$P_g(t) = (1000R_g T/M_r) \rho_g(t) T = A \rho_g(t) T \quad (4)$$

式中, R_g 为气体常数; T 为熔体温度; M_r 为气体相对分子量; ρ_g 为泡孔内气体密度; $A=1000R_g T/M_r$,对给定气体 A 为常数。

根据泡孔内气体的质量守恒,泡孔壁处的质量流量可描述为^[12]:

$$\frac{d}{dt}(P_g R^3) = 3R^2 \rho D \frac{\partial c}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (5)$$

联合方程(4)和(5)可得到:

$$3\rho \int_R^S \frac{c_0 - c}{c_0 - c_w} r^2 dr = \frac{\rho_g R^3 - \rho_{g0} R_0^3}{c_0 - c_w} \quad (6)$$

为便于计算,可假定 SCF 初始质量分数和壁面处质量分数满足二阶多项关系式:

$$\frac{c_0 - c}{c_0 - c_w} = \begin{cases} 0 & r \geq S \\ \left[1 - (r - R)/(S - R) \right]^2 & R \leq r < S \end{cases} \quad (7)$$

更进一步,联合上述方程可得到:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P_g R^3}{R_g T} \right) = \frac{6\rho D k_h R_g T (P_{g0} - P_g)^2 R^4}{P_g R^3 - P_{g0} R_0^3} \quad (8)$$

最后,通过求解方程(1),(8)即可获得泡孔尺寸和泡孔内压力等的情况。

2 模型与参数

数值模拟模型采用中心浇口矩形平板,尺寸为 186 mm × 114 mm × 3.5 mm,圆角半径为 6 mm,运用中面技术进行网格划分,节点总数为 1169,三角形单元总数为 2212,单元最小纵横比为 1.16,最大纵横比为 1.60,平均纵横比 1.25,网格质量高,完全能满足计算要求,有限元模型如图 1 所示。

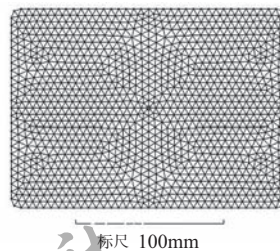


图 1 数值模拟有限元模型

材料选用 ABS (制造商: Ineos 公司, 牌号: Lustran ABS H802), 气体选用 N_2 。为了分析泡孔尺寸影响因素及变化规律,笔者采用单因素法,即在标准参数的基础上,通过改变某一参数值,其余参数值保持不变,分别研究各参数对泡孔尺寸的影响,其中参数分为两类,一类是与传统注塑成型工艺相同的工艺参数,包括注射时间、熔体预注射量、熔体温度、模具温度;另一类是微孔发泡注塑成型工艺特有的参数,即 SCF 控制参数,包括 SCF 质量分数、初始泡核浓度、初始泡孔半径。标准参数设置见表 1。

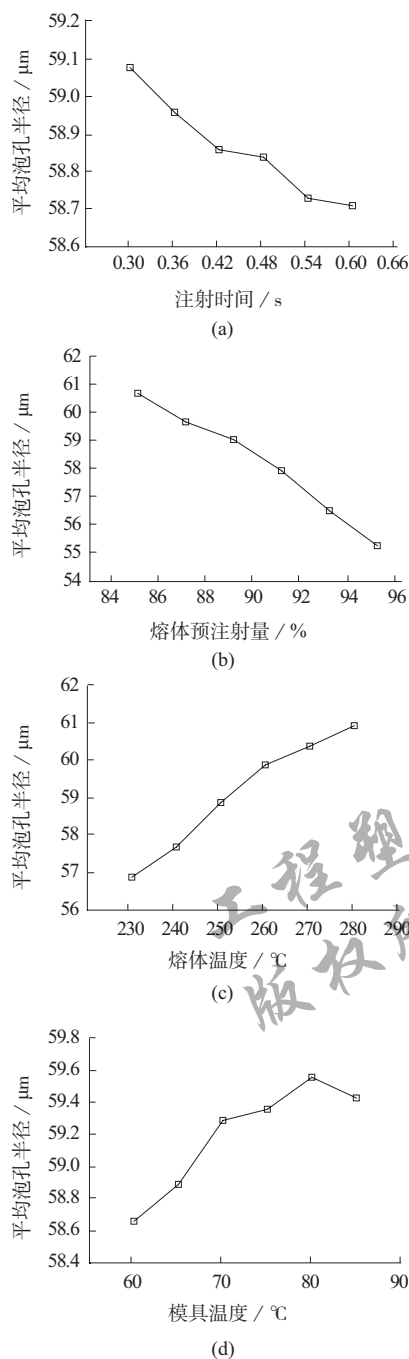
表 1 标准参数

注射时间/s	预注射量/%	熔体温度/℃	模具温度/℃	SCF 质量分数/%	初始泡核浓度/ ($\times 10^{11} \cdot \text{cm}^{-3}$)	初始泡孔半径/ μm
0.4	90	250	80	0.5	2	1

3 结果与讨论

由于泡孔数量巨大,分析单个泡孔尺寸的影响因素意义不大,因此平均泡孔半径可作为泡孔尺寸的重要度量,同时为了简化数据处理,本文中的泡孔尺寸均采用中面泡孔半径的算术平均,即平均泡孔半径来描述。

图 2 为平均泡孔半径随注射时间、熔体预注射量、熔体温度和模具温度的变化关系图。从图 2 中可以看出:随着注射时间的增加,平均泡孔半径逐渐减小,当熔体预注射量相同时,随着注射时间增加,熔体进入模腔的流率减小,这时所需的注射压力更小,熔体的剪切速率降低,从而产生较少的剪切



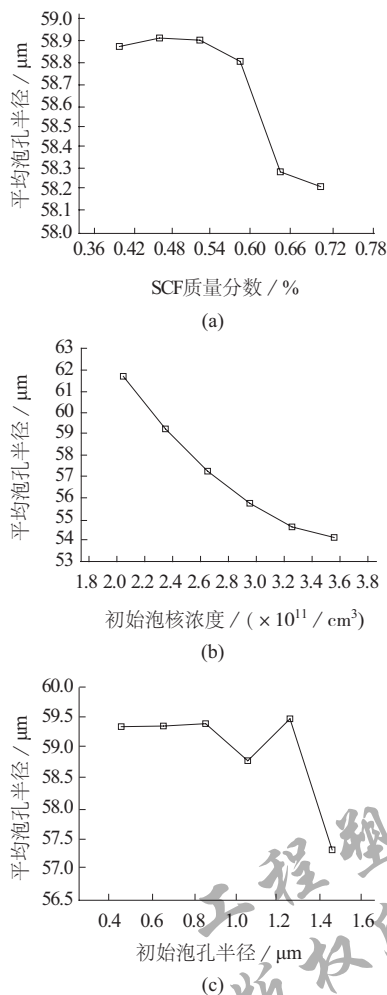
工艺参数: a—注射时间; b—熔体预注射量; c—熔体温度; d—模具温度

图2 平均泡孔半径随工艺参数变化图

热,导致熔体黏度更高,泡孔长大过程的界面压力作用增大,导致平均泡孔半径减小,此外,更小的注射压力不利于 SCF 在熔体中的溶解,因而当 SCF 质量分数固定时,单个泡核的 SCF 含量会减小,泡孔长大过程的驱动力降低,此时平均泡孔半径也会减小;随着熔体预注射量的增加,平均泡孔半径逐渐减小,且在所考察区间内,平均泡孔半径受熔体预注射量的影响十分显著,这是因为随着熔体预注射量的增

加,泡孔尺寸的增长空间由于彼此之间的排挤而受到限制,同时, SCF 在熔体中浓度相同,可认为泡孔长大的驱动力没有变化,因此平均泡孔半径减小,此外,由于注射时间相同,熔体预注射量的增加需要更高的注射压力,将有利于产生更多的均匀泡核,但泡孔长大过程的界面压力作用增加,也会使平均泡孔半径减小;随着熔体温度的升高,平均泡孔半径逐渐增大,其原因在于,熔体温度的升高会导致熔体黏度的降低,从而熔体与泡孔界面的压力作用减弱,这有助于提升泡核的长大速率和 SCF 的扩散程度,扩散程度的升高则意味着更多的 SCF 有机会进入泡核,为泡孔的长大提供更大的动力,因此可进一步获得更快的泡孔长大速率,加速泡孔的长大过程^[13];随着模具温度的升高,平均泡孔半径总体呈现增大的趋势,但变化区间比熔体温度的影响小得多,这主要是因为模具温度的升高使熔体固化所需的时间延长,因此同一时刻泡孔所受界面压力作用减小,这有利于泡孔的长大,但是,由于模具表面距离模腔中面相对较远,模具温度需要通过热传导对中面平均泡孔半径产生影响,因此,相较熔体温度,模具温度对中面平均泡孔半径的影响较小。

图3为平均泡孔半径随 SCF 质量分数、初始泡核浓度、初始泡孔半径的变化关系图。从图3中可以看出:随着 SCF 质量分数的增加,初始阶段平均泡孔半径只有轻微的变化,但随后却较显著减小,这是因为当 SCF 质量分数较低时, SCF 的增加量主要用来提高泡孔密度,以满足泡孔长大所需的驱动力,但随着 SCF 质量分数的进一步增加, SCF 的成核率将随之增加,意味着泡核数量会增加,此时单个泡核的密度增加不明显,会抑制泡孔的长大过程,这与实验结果一致^[14];随着初始泡孔半径的增加,当初始泡孔半径较小时,平均泡孔半径变化很小,当初始泡孔半径达到 $1.2\mu\text{m}$ 后,平均泡孔半径开始较快下降,表明初始泡孔半径存在一个相对稳定的区间,在该区间初始泡孔半径的变化对平均泡孔半径影响不大,然而,随着初始泡孔半径持续增大,泡孔开始变得不稳定,在界面压力作用下趋向于分裂成更多的泡核,泡核密度的下降使平均泡孔半径减小;随着初始泡核浓度的增加,平均泡孔半径呈现下降先快后慢的变化趋势,即当初始泡核浓度较小时,随着初始泡核浓度增加,平均泡孔半径快速下降,但当初始泡核浓度增加到一定程度时,平均泡孔半径的下降



SCF 控制参数: a—SCF 质量分数; b—初始泡核浓度; c—初始泡孔半径

图3 平均泡孔半径随 SCF 控制参数变化图

趋势又趋于平缓,这是因为当 SCF 质量分数不变时,初始泡核浓度越高则意味着单个泡核的 SCF 含量越小,即单个泡孔长大过程所需的驱动力越小,因此初始泡核浓度升高就会得到更小的平均泡孔半径,但是,伴随泡核浓度继续增加,由于泡核数量过多,泡孔尺寸增长将放缓。

4 结论

以中心浇口矩形平板为研究对象,基于数值模拟技术,研究并分析了微孔发泡注塑成型工艺泡孔尺寸的影响因素及机理,结论如下:

(1) 随着注射时间的增加,平均泡孔半径逐渐减小;随着熔体预注射量的增加,平均泡孔半径逐渐减小,且在所考察区间内,平均泡孔半径受熔体预注射量的影响十分显著;随着熔体温度的升高,平均泡孔半径逐渐增大;随着模具温度的升高,平均泡孔半径总体呈现增大的趋势,但变化区间比熔体温度的影响小得多。

(2) 随着 SCF 质量分数的增加,初始阶段平均泡孔半径只有轻微的变化,但随后却较显著减小;随着初始泡孔半径的增加,当初始泡孔半径较小时,平均泡孔半径变化很小,当初始泡孔半径达到 1.2 μm 后,平均泡孔半径开始较快下降;随着初始泡核浓度的增加,平均泡孔半径呈现下降先快后慢的变化趋势。

针对上述结论,还从熔体黏度、SCF 与熔体界面作用、SCF 成核与泡孔长大动力学等方面分析了结论的合理性,可为微孔发泡注塑成型工艺参数调整及 SCF 参数控制提供理论指导。

参考文献

- [1] 张梦梦,杜继涛. 微孔发泡工艺参数对典型零件泡孔直径的影响[J]. 塑料,2016,45(3):39-41.
Zhang Mengmeng, Du Jitao. Effect of microcellular foaming process parameters on cell diameter of typical part[J]. Plastics, 2016,45(3):39-41.
- [2] 李树松,闫宝瑞,安华亮. 基于 Moldex3D 分析模具温度对 PP 发泡注塑制品的影响[J]. 中国塑料,2019,33(1):58-63,128.
Li Shusong, Yan Baorui, An Hualiang. Study on effect of mold temperature on PP-foamed injection-molded products based on Moldex3D analysis [J]. China Plastics, 2019,33(1):58-63,128.
- [3] 张翔,王恒,蒋团辉,等. 气体反压对微孔发泡注塑制品泡孔质量的影响[J]. 工程塑料应用,2018,46(11):62-66.
Zhang Xiang, Wang Heng, Jiang Tuanhui, et al. Effect of gas counter pressure on the foaming behavior of microcellular injection products[J]. Engineering Plastics Application, 2018,46(11):62-66.
- [4] 董桂伟,赵国群,管延锦,等. 超临界流体辅助微孔发泡注塑技术及其熔体发泡行为[J]. 机械工程学报,2018,54(18):42-48.
Dong Guiwei, Zhao Guoqun, Guan Yanjin, et al. Supercritical fluid assisted microcellular injection molding and the melt foaming behaviors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,54(18):42-48.
- [5] 严庆光,王绘芳,郑勇福. 聚苯乙烯微孔发泡中气泡长大及冷却定型模拟[J]. 复合材料学报,2018,35(5):1182-1191.
Yan Qingguang, Wang Huifang, Zheng Yongfu. Numerical simulation of bubble growth and solidification in microcellular foamed polystyrene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018,35(5):1182-1191.
- [6] 吴明辉,郭强,覃康培,等. 退火对 PP/PTFE 发泡材料力学性能和微结构的影响[J]. 工程塑料应用,2019,47(5):71-77.
Wu Minghui, Guo Qiang, Qin Kangpei, et al. Effects of annealing on mechanical properties and microstructure of PP/PTFE foams[J]. Engineering Plastics Application, 2019,47(5):71-77.
- [7] 王萧宇,王利霞,杨学成,等. 聚合物间歇微发泡泡孔形态演化过程的数值分析[J]. 工程塑料应用,2019,47(9):68-71+76.

(下转第 90 页)

- molding machine[J]. *Plastics*, 2016, 45(2):121.
- [8] 刘洋洋. 浅析广数精密全电动注塑机的电气控制[J]. *科技创新与应用*, 2015(5): 19–20.
- Liu Yangyang. A brief analysis on electrical control system of precision all-electric injection molding machine by Guangshu[J]. *Technology Innovation and Application*, 2015(5): 19–20.
- [9] 蒋相帅. 关于全电动注塑机人性化设计探讨[J]. *装备制造技术*, 2016(6): 255–257.
- Jiang Xiangshuai. Discussion on humanized design of all-electric injection molding machine[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2016(6): 255–257.
- [10] 廉良冲. FANUC Oi-MD 系统的数控机床开机无法回零的故障诊断与修复[J]. *制造技术与机床*, 2010(11):103–104.
- Lian Liangchong. CNC return home fault and fault diagnosis of FANUC Oi-MD system[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2010(11):103–104.
- [11] 陈伟海, 陈泉柱, 刘荣, 等. 绳驱动拟人臂机器人回零算法分析[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2013, 47(2):345–352.
- Chen Weihai, Chen Quanzhu, Liu Rong, et al. Homing algorithm analysis of a cable-driven humanoid-arm manipulator[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2013, 47(2):345–352.
- [12] 陈福明, 范铭, 石明明, 等. CNC 数控机床回零故障研究[J]. *工程机械文摘*, 2015(5):79–82.
- Chen Fuming, Fan Ming, Shi Mingming, et al. Research on returning home fault of CNC machine tool[J]. *Construction Machinery Digest*, 2015(5):79–82.
- [13] 高建设, 陶征, 程丽, 等. 新型五自由度并联机床回零研究[J]. *机床与液压*, 2009, 37(6):7–9, 44.
- Gao Jianshe, Tao Zheng, Cheng Li, et al. Homing research of a new type of 5-DOF parallel machine tool[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2009, 37(6):7–9, 44.
- [14] 邹金桥, 姜晓强, 徐文源. 基于数控机床栅格法回零机制的分析及故障诊断[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2006(11):63–64, 74.
- Zou Jinqiao, Jiang Xiaoqiang, Xu Wenyuan. The analysis and fault diagnosis of returning home with grid method based on CNC machine tools[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2006(11):63–64, 74.
- [15] 黄登红, 熊轶娜. 数控机床挡块式回零的控制原理及常见故障分析[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2009(3):52–54.
- Huang Denghong, Xiong Yina. The principle of CNC machine tools return home with deceleration dog and its fault diagnosis[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2009(3):52–54.
- [16] 任晓虹, 吴芳, 孙建业. 数控机床的回零及应用[J]. *机械设计与制造*, 2009(5):193–194.
- Ren Xiaohong, Wu Fang, Sun Jianye. Reset of CNC machine tool and its application[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(5):193–194.

(上接第 58 页)

- Wang Xiaoyu, Wang Lixia, Yang Xuecheng, et al. Numerical analysis of cell morphology evolution process of polymer batch micro foaming[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(9):68–71, 76.
- [8] Chen Shiachung, Liao Wonhsion, Chien Reander. Structure and mechanical properties of polystyrene foams made through microcellular injection molding via control mechanisms of gas counter pressure and mold temperature[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, 39(8):1 125–1 131.
- [9] Amon M, Denson C D. A study of the dynamics of foam growth: Analysis of the growth of closely spaced spherical bubbles[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1984, 24 (13):1 026–1 034.
- [10] Han S, Kennedy P, Zheng R, et al. Numerical analysis of microcellular injection molding[J]. *Journal of Cellular Plastics*, 2003, 39(6):475–485.
- [11] Feng J J, Bertelo C A. Prediction of bubble growth and size distribution in polymer foaming based on a new heterogeneous nucleation model[J]. *Journal of Rheology*, 2004, 48 (2):439–462.
- [12] 马学, 蒋涛. 聚合物发泡泡孔尺寸调控[J]. *塑料工业*, 2007, 35(11):37–39.
- Ma Xue, Jiang Tao. Control of final bubble radius in polymer foaming[J]. *China Plastics Industry*, 2007, 35(11):37–39.
- [13] Arefmanesh A, Advani S G, Michaelides E E. A numerical study of bubble growth during low pressure structural foam molding process[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1990, 30(20):1 330–1 337.
- [14] 张建伟, 王澜, 王佩璋. 超临界流体技术在微孔发泡聚合物制备中的应用[J]. *广东塑料*, 2005, 135(10):33–37.
- Zhang Jianwei, Wang Lan, Wang Peizhang. The application of supercritical fluids foamed technique on foamed plastics[J]. *Guangdong Plastics*, 2005, 135(10):33–37.