DOI: 10.3901/JME.2020.18.035

基于高保压与开模发泡的微孔发泡注塑产品 发泡行为控制与泡孔结构改善^{*}

董桂伟 赵国群 武欢 王桂龙

(山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 济南 250061)

摘要: 针对微孔发泡注塑技术存在的工艺和产品质量问题,构建高保压和开模发泡微孔发泡注塑系统,试验研究不同工艺条件下微孔发泡注塑 co-PP 的熔体发泡行为和产品泡孔结构演变。结果表明,高保压和开模发泡能够良好调控微孔发泡注塑熔体的发泡行为,改善产品泡孔结构。在高保压压力和长保压时间作用下,微孔发泡注塑熔体填充过程中形成的泡孔进一步变形并重新溶回到熔体中,同时填充结束后发泡的熔体保持不发泡,使型腔中的熔体整体回复到一个较稳定的未发泡状态。开模发泡时,模具打开一定距离,给予熔体一个充足的发泡空间,使型腔中的未发泡熔体压力迅速下降,泡孔稳定长大,最终得到具有高发泡倍率和良好泡孔结构的微孔发泡注塑产品。微孔发泡注塑熔体发泡行为及其对应产品泡孔结构的调控与改善,关键在于对其填充过程中发泡的控制和填充结束后发泡的促进两方面。

关键词: 高保压; 开模; 微孔发泡注塑; 发泡行为; 泡孔结构

中图分类号: TQ328

Foaming Behavior Control and Cell Structure Modification of Microcellular Injection Molded Parts by High Pressure Packing and Mold Opening

DONG Guiwei ZHAO Guoqun WU Huan WANG Guilong

(Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials
of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: In view of the existing process and product quality problems of microcellular foam injection technology, a high pressure packing and mold opening microcellular foam injection system is established in this paper. The melt foaming behavior of microcellular foam injection co-PP and the evolution of product cell structure under different process conditions were experimentally studied. The results show that the foaming behavior of microcellular foam injection melt can be well controlled by high pressure packing and mold opening, and the cell structure of the product can be improved. Under the action of high packing pressure and long packing time, the bubbles formed in the filling stage of microcellular foam injection molding further deform and re-dissolve into the melt. At the same time, the melt of “foam after filling” keeps non-foaming, which makes the whole melt in the cavity return to a relatively stable non-foaming state. When the mold is opened for foaming, the mold is opened for a certain distance to give the melt a sufficient foaming space, so that the pressure of the unfoamed melt in the mold cavity drops rapidly, and the foam cell grows stably. Finally, the microcellular foam injection product with high foaming ratio and good foam cell structure is obtained. The key to control and improve the foaming behavior of microcellular foam injection molding melt and the corresponding product cell structure lies in the control of foaming during the filling process and the promotion of foaming after the filling.

Key words: high pressure packing; mold opening; microcellular injection molding; foaming behavior; cell structure

^{*} 国家自然科学基金(51875318)和材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题基金(P2018-002)资助项目。20200424 收到初稿, 20200620 收到修改稿

0 前言

聚合物微孔发泡注塑是一种以热塑性塑料为基体、以超临界流体为物理发泡剂,生产内部含有大量微米级泡孔的塑料成型工艺^[1],在产品轻量化、工艺绿色化方面具有显著优势,近年来得到了国内外的广泛关注,已成功应用于包装产品、汽车零部件、电气元件、商业设备和打印机部件以及生物医学器件等多个领域^[2-4]。

与聚合物间歇发泡工艺相比,微孔发泡注塑是一种融合了聚合物发泡与注射成型的综合技术,其熔体的发泡过程和行为受注塑填充阶段熔体流动、熔体压力分布和模具温度等因素的影响显著,导致目前该技术仍存在一些工艺和产品质量问题亟待解决^[5-7]。这些问题主要表现在:受模具型腔的限制,微孔发泡注塑制品的发泡倍率普遍不高,目前其常规产品的减重比率仅为 5%~20%;内部泡孔结构控制难度较大,容易出现泡孔形状不规则、分布不均匀等问题,造成产品质量起伏较大或部分性能下降明显;同时,微孔发泡注塑制品表面通常存在漩涡痕、银纹等缺陷,致使产品表面粗糙度大、光泽度低,难以作为外观件直接使用。

为了解决上述问题,业界开展了大量的探索,提出了一系列诸如分段注射^[8]、型腔气体反压^[9-10]、变模温^[11-12]、注射后压缩^[13]、内部气辅^[14]等辅助工艺和方法,在微孔发泡注塑产品的泡孔结构调控和表面质量提升等方面取得了一定的改善效果。但综合来看,这些辅助工艺大都针对表面质量或泡孔形貌等某一具体问题而开发,尚未从科学调控熔体发泡过程、行为与改善泡孔结构这一关键基础问题上建立综合解决方案,如提出的型腔气体反压法^[10,15]在改善表面质量方面具有优势,但却不利于泡孔的形核和生长,存在一定的技术不足。

随着研究的深入,人们发现微孔发泡注塑过程中存在“填充过程中发泡”和“填充结束后发泡”两个发泡阶段^[16-17]:前者属动态发泡,是产生泡孔形状不规则和分布不均匀问题的主要因素;后者属静态发泡,是形成规则和均匀泡孔的主要阶段,但受模具型腔和温度等的限制,该阶段的发泡空间和能力相对较小。这种特有的“两段式”发泡过程是导致微孔发泡注塑产品内外泡孔结构缺陷的根本原因,研究开发能够消除填充过程中发泡影响同时增强填充结束后发泡空间和能力微孔发泡注塑新方

法,对综合提升产品发泡倍率、改善内外泡孔质量以及拓展应用范围具有重要意义。

基于此,近年来高压发泡和开合模技术被引入到微孔发泡注塑工艺中^[18-19],通过在填充结束后,对熔体施加相对高的保压压力(一般大于 10 MPa),使填充过程中发泡的泡孔重新溶回到熔体中,然后沿合模方向快速打开一定距离,给予熔体一个充足的填充结束后发泡空间,实现了对“两段式”发泡过程的良好调控。利用该技术,WANG 等^[20-21]制备了密度只有 0.17 g/cm³的聚醚嵌段酰胺(Polyether block amide, PEBA)注塑泡沫和减重比率高达 60%的高抗冲聚苯乙烯(High impact polystyrene, HIPS)注塑泡沫,ZHAO 等^[22]制备了高发泡倍率并具有优异隔热和压缩性能的聚丙烯/聚四氟乙烯(Branched polypropylene/Poly tetra fluoroethylene, BPP/PTFE)注塑泡沫,均实现了微孔注塑产品发泡倍率和性能的明显提升。但作为一项新的成型技术,其高压和开模发泡协同作用下的熔体发泡行为变化及其对应的产品泡孔结构演变过程尚不十分明确,导致其产品泡孔结构调控还缺乏系统的认识和科学指导,影响了该技术的进一步推广和发展。

为此,本文构建了基于高压和开模发泡的微孔发泡注塑系统,以共聚聚丙烯(Copolymerized polypropylene, co-PP)为材料,系统研究其在不同保压压力、保压时间以及开模距离等工艺条件下的发泡行为,分析熔体发泡行为与产品泡孔结构间的影响关系,确立合理控制熔体发泡行为与改善产品泡孔结构的工艺策略,为微孔发泡注塑产品的质量调控提供指导和依据。

1 高压与开模发泡微发泡注塑系统

高压与开模发泡微孔发泡注塑系统建立的关键在于二次开模功能的设计与实现。对于传统的液压式注塑机,二次开模功能一般通过在模具上加液压站等动力机构来构建,但这种方法结构复杂,且其一次开模距离的控制精度较低,难以对填充结束后的发泡过程进行精确调控。电动注塑机自带二次开模功能,兼之其通过丝杠传动,控制精度可达 0.01 mm,是开模发泡注塑设备的首选。因此,本文选用长飞亚 ZE900 型电动注塑机(锁模力 9 000 kN,螺杆直径 100 mm)为注塑设备,配备 Mucell-T100 超临界流体控制系统、Byes-9KW 模温机、Herzog HP 型自锁喷嘴等辅助装置,构建了如图 1 所示的高

保压与开模发泡微孔发泡注塑系统。

图1 高压与开模发泡微孔发泡注塑系统

为系统研究高压与开模发泡协同作用下的微孔发泡注塑熔体的发泡行为及其对应的产品泡孔结构演变,本文设计了如图2a所示的平板试验产品和图2b所示的微孔发泡注塑模具。其中,试验平板产品尺寸(长×宽×厚)为150 mm×120 mm×3 mm,采用扇形浇口设计;模具采用针阀式热流道浇注,使用模温机的循环水进行快速加热和冷却。

图2 产品与模具结构

2 试验材料与方法

2.1 试验原料

试验所用塑料原料为韩国 SK 公司生产的共聚聚丙烯 co-PP, 牌号 B391G, 其熔体流动速率为 40 g/10 min (220 °C/10 kg)。注塑成型前,塑料经充分的干燥处理以去除水分(80 °C下干燥 4 h)。试验所

用物理发泡剂为济南德洋特种气体有限公司生产的纯度 99.99% 的瓶装氮气。

2.2 试验方案

工艺调试稳定后,首先进行了无保压和无开模发泡工艺条件下的微孔发泡注塑试验,获得了常规微孔发泡注塑试验样品,用作对比研究。然后,设定注射速度、熔体温度、射胶位移、打气百分比等工艺参数保持不变,选取保压压力、保压时间和开模距离为工艺参数变量,进行不同工艺条件下的高压与开模发泡微孔发泡注塑试验,获得相应条件下的试验样品。表1给出了不同工艺条件下的样品编号与工艺参数变量的对应关系,表2为其他保持不变的工艺参数设定。

表1 试验样品编号与工艺参数变量对应关系

样品编号	保压压力 p/MPa	保压时间 t/s	开模距离 s/mm
Sa-1	5	5	0
Sa-2	5	5	3
Sa-3	5	5	5
Sa-4	5	10	0
Sa-5	5	10	3
Sa-6	5	10	5
Sa-7	5	20	0
Sa-8	5	20	3
Sa-9	5	20	5
Sb-1	10	5	0
Sb-2	10	5	3
Sb-3	10	5	5
Sb-4	10	10	0
Sb-5	10	10	3
Sb-6	10	10	5
Sb-7	10	20	0
Sb-8	10	20	3
Sb-9	10	20	5
Sc-1	15	5	0
Sc-2	15	5	3
Sc-3	15	5	5
Sc-4	15	10	0
Sc-5	15	10	3
Sc-6	15	10	5
Sc-7	15	20	0
Sc-8	15	20	3
Sc-9	15	20	5
Sd-1	20	5	0
Sd-2	20	5	3
Sd-3	20	5	5
Sd-4	20	10	0
Sd-5	20	10	3
Sd-6	20	10	5
Sd-7	20	20	0
Sd-8	20	20	3
Sd-9	20	20	5

表2 其他工艺参数设定

工艺参数	数值	工艺参数	数值
注射速度/(mm/s)	80	螺杆压力/MPa	135
熔体温度/℃	230	模具温度/℃	60
射胶位移/mm	70	产品质量/g	55
冷却时间/s	30	打气百分比(%)	0.8

2.3 测试表征

将本研究在不同保压参数及开模距离下得到的微孔发泡注塑件,首先从浇口位置沿熔体流动方向切割出宽度为 20 mm 的带材。然后,对每一条带材从浇口位置起,沿垂直熔体流动方向每隔 60 mm 切割出尺寸为 20 mm×10 mm 的试验观测样品,共切割出三个样品,最后沿平行于熔体流动方向断开进行观察,观察断面分别记为 I、II、III。所有样品在液氮环境中浸泡后脆断,表面喷金后,在 JSM-6610LV 型扫描电镜下观察断面的泡孔结构。上述样品的取样位置、观察断面如图 3 所示。

图3 取样位置与观察断面

3 结果与讨论

3.1 常规微孔发泡注塑产品泡孔结构

图4给出了无保压和无开模发泡工艺条件下得到的常规微孔发泡注塑 co-PP 试样的内部泡孔结构。可以发现,在常规微孔发泡注塑条件下,试样断面 I 和断面 II 处的泡孔形状较为规则,而断面 III 处的泡孔存在明显的变形,变成了不规则的长椭圆形,且其变形方向和变形程度与熔体的流动速度分布基本一致,这说明靠近产品末端的泡孔是在熔体填充过程中形成的,且受熔体的填充流动行为影响而发生了变形,而产品中间和靠近浇口位置的泡孔则是在填充结束后形成的。这

与已有的研究结果^[16]相一致,也进一步印证了微孔发泡注塑填充过程中熔体经历的两个泡孔形成过程。显然,靠近填充末端的不规则泡孔结构必将导致产品性能的下降,是进行泡孔结构调控的关键。同时,从图中还可看出,常规微孔发泡注塑 co-PP 产品的泡孔尺寸较大、密度较低,发泡倍率也较小,整体减重仅有 7.8%。

图4 常规微孔发泡注塑 co-PP 的断面泡孔结构

3.2 施加保压后微孔发泡注塑产品泡孔结构

单独施加保压(开模距离 0 mm)时试样断面 III 处的泡孔结构变化如图5所示。对比图4可见,在 5 MPa 和 10 MPa 两个较低的保压压力作用下,断面 III 处的泡孔形状仍是椭圆形,但其结构开始出现变化:一是发泡层中心的泡孔变形程度加剧;二是发泡层两侧的泡孔尺寸变小、密度变大,且随着保压时间的延长,这些致密泡孔由外向内逐渐消失。这表明,施加保压可以使填充过程中形成的泡孔进一步发生变形,并逐渐变得细小致密,进而从发泡层两侧向中心渐渐消失,重新溶回到熔体中。进一步增加保压压力和延长保压时间,这种重溶现象更加明显,当保压压力增加至 15 MPa 及以上、保压时间延长至 10 s 及以上时,整个断面几乎看不到泡孔的存在。这说明从上述保压条件开始,填充过程中形成的泡孔已经基本重新溶回到熔体中,继续增加保压压力或延长保压时间,泡孔重溶的更完全,在本试验的最大保压压力 20 MPa 和最长保压时间 20 s 条件下,试样的断面已经与普通注塑的实心产品断面一致,如图4中标号 Sd-7-III所示。

(a) $p=5$ MPa

图 5 单独施加保压微孔发泡注塑 co-PP 断面 III 处泡孔结构

对于试样断面 I 和断面 II 处的泡孔结构,在施加保压后,其随保压压力增加和保压时间延长的基本变化情况如图 6 所示。可以发现,在较低的保压压力和保压时间条件下,这两个断面处的泡孔结构与常规微孔发泡注塑产品变化不大,当增加保压压力和延长保压时间后,泡孔变得细小,而随着保压压力和保压时间的进一步增加,当保压压力为 20 MPa、保压时间为 20 s 时,断面基本无泡孔形成。需要指出的是,这两处断面泡孔结构随保压工艺的变化与断面 III 处泡孔结构随保压工艺的变化貌似一致,但其存在本质上的不同:断面 I 和断面 II 处的泡孔是在填充结束后形成的,保压工艺影响的是其形成过程,高保压的施加造成填充结束后熔体的压力降大幅减小而泡孔不能形核是此两处断面无泡孔形成的原因;而断面 III 处的泡孔是在填充过程中形成的,高保压直接作用在已经形成的泡孔上,使其再次溶回到熔体中是该处无泡孔形成的缘故。

图 6 单独施加保压微孔发泡注塑 co-PP 断面 I 和断面 II 处的泡孔结构变化

3.3 开模发泡微孔发泡注塑产品泡孔结构

开模发泡即在保压结束后模具迅速开启一定距离,给予熔体一个充足的发泡空间进行发泡。对于在较低保压压力和保压时间条件下,开模发泡得到试样断面泡孔结构如图 7 所示。可以发现,在保压压力 5 MPa、保压时间 5 s 条件下,开模 3 mm 得到的试样断面泡孔结构较常规微孔发泡注塑试样更加不规则,中间泡孔尺寸更大且出现破裂和空洞,这是因为在较低的保压工艺条件下,填充过程中发泡的泡孔还未来得及全部溶回到熔体中,开模发泡致使其在原有变形泡孔基础上进一步自由膨胀所致。

图 7 较低保压压力和保压时间条件下开模发泡微孔发泡注塑 co-PP 的断面泡孔结构

图 8 给出了在高保压工艺条件下,开模发泡得到的微孔发泡注塑试样的断面泡孔结构。明显可见,在保压压力 15 MPa 或 20 MPa、保压时间 20 s 条件下,开模距离 3 mm 和 5 mm 时获得的微孔发泡注塑 co-PP 试样均具有良好的断面泡孔结构,其三个观察断面处的发泡层泡孔致密,泡孔形状规则、分布均匀,且大小基本一致。经测量,图示工艺条件下得到的微孔发泡注塑 co-PP 试样的减重达 46% 和 58%,试样的减重和发泡倍率有了明显提高。利用图像处理软件 Image-Pro Plus 对试样断面的 SEM 照片进行统计计算,得到保压压力 15 MPa、保压时间 20 s、开模距离 3 mm 工艺条件下的试样断面平均泡孔直径为 $73 \mu\text{m}$ 、泡孔密度为 3.6×10^8 个/ cm^3 ;保压压力 20 MPa、保压时间 20 s、开模距离 5 mm 工艺条件下的试样断面平均泡孔直径为 $47 \mu\text{m}$ 、泡孔密

度为 4.8×10^9 个/ cm^3 。这表明,通过高保压工艺条件,令微孔发泡注塑填充过程中形成的泡孔重新溶回到熔体中,使熔体回复到未发泡状态,然后通过开模发泡可以获得接近于间歇发泡所得试样的良好泡孔结构,实现了微孔发泡注塑产品泡孔结构的大幅提升和改善。

图8 高工艺条件下开模发泡微孔发泡注塑 co-PP 的断面泡孔结构

3.4 高压与开模发泡作用下的熔体发泡行为控制

从上述结果分析可知,施加保压工艺特别是在高压压力和长保压时间条件下,可以使微孔发泡注塑填充过程中形成的泡孔重新溶回到熔体中,同时还可保证填充结束后发泡的熔体不提前发泡,从而在模具型腔中建立一个稳定的未发泡熔体状态。然后通过快速的开模,使模具打开一定距离,给予型腔中的熔体一个充足的发泡空间,释放其发泡能力,最终可获得具有良好泡孔结构的微孔发泡注塑产品。可知,高压和开模发泡通过对微孔发泡注塑熔体填充过程中和填充结束后两个发泡过程和发泡行为的控制,实现了微孔发泡注塑产品泡孔结构的改善。图9给出了高压和开模发泡作用下的微孔发泡注塑熔体发泡行为控制机理示意图。

如图9所示,在微孔发泡注塑填充阶段,先进入到模具型腔的熔体由于压力的急剧下降发生填充过程中发泡,后进入型腔的熔体由于压力降的逐渐减小而不再发生填充过程中发泡,待填充结束后发泡,这是常规微孔发泡注塑的熔体发泡过程,由于两个发泡过程的存在,导致产品沿填充方向存在规则泡孔结构和变形泡孔结构两种形式。在高压和

开模发泡微孔发泡注塑工艺下,熔体填充结束后,马上进入高压状态,受高压压力和长保压时间的作用,熔体中填充过程中发泡形成的泡孔会重新溶回到熔体中,使型腔中的熔体回复到一个较稳定的未发泡状态;保压一结束,模具立刻打开一定距离,给予熔体一个充足的发泡空间,并使型腔中的未发泡熔体压力迅速下降,由于此时熔体不再有流动,泡孔可保持与静态发泡过程类似的稳定长大过程,最终得到具有高发泡倍率和良好泡孔结构的微孔发泡注塑产品。

图9 高压和开模发泡作用下的微孔发泡注塑熔体发泡行为控制机理

另外,从上述高压和开模发泡作用下的微孔发泡注塑熔体发泡行为的控制机理还可总结得到,对微孔发泡注塑熔体发泡行为及其对应产品泡孔结构的调控与改善策略,关键在于对其填充过程中发泡的控制和填充结束后发泡的促进两方面。对于控制熔体的填充过程中发泡,可以从两个方面入手,一是发泡后再消除,本文使用的高压方法即是如此;二是抑制其发泡,现有研究中型腔反压技术就是通过建立填充过程中熔体的反向压力,使进入到型腔中熔体的压力降不足以形核发泡而不发生发泡过程,只是抑制熔体完全不发泡需要一个相当大的

反压压力。对于促进熔体的填充结束后发泡, 给予熔体充足的发泡空间释放其发泡能力是重点, 开模发泡是目前效果相对较好的方法。

4 结论

(1) 构建了高保压和开模发泡微孔发泡注塑系统, 试验研究了不同工艺条件下微孔发泡注塑 co-PP 的熔体发泡行为和产品泡孔结构演变。结果表明, 高保压和开模发泡能够良好调控微孔发泡注塑熔体的发泡行为, 改善产品泡孔结构。

(2) 高保压压力和长保压时间作用下, 微孔发泡注塑熔体填充过程中形成的泡孔进一步变形并重新溶回到熔体中, 同时填充结束后发泡的熔体保持不发泡, 使型腔中的熔体整体回复到一个较稳定的未发泡状态。

(3) 开模发泡条件下, 模具打开一定距离, 给予熔体一个充足的发泡空间, 使型腔中的未发泡熔体压力迅速下降, 泡孔稳定长大, 最终得到具有高发泡倍率和良好泡孔结构的微孔发泡注塑产品。

(4) 微孔发泡注塑熔体发泡行为及其对应产品泡孔结构的调控与改善, 关键在于对其填充过程中发泡的控制和填充结束后发泡的促进两方面。

参 考 文 献

- [1] MARTINI J E, WALDMAN F A, SUH N P. The production and analysis of microcellular thermoplastic foam[J]. SPEANTEC Tech Papers, 1982, 28: 674-676.
- [2] WANG L, HIKIMA Y, OHSHIMA M, et al. Evolution of cellular morphologies and crystalline structures in high-expansion isotactic polypropylene/cellulose nanofiber nanocomposite foams[J]. RSC Advances, 2018, 8: 15405-15416.
- [3] KASEMPHAIBULSUK P, HOLZNER M, KUBOKI T, et al. Foam injection molding of glass fiber reinforced polypropylene composites with laminate skins[J]. Polymer Composites, 2017, 39: 4322-4332.
- [4] VOLPE V, LANZILLO S, AFFINITA G, et al. Lightweight high-performance polymer composite for automotive applications[J]. Polymers, 2019, 11: 326-342.
- [5] ZHOU Y, GONG W, HE L. Application of a novel organic nucleating agent: Cucurbit 6 uril to improve polypropylene injection foaming behavior and their physical properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134: 44538-44546.
- [6] ZHANG L, ZHAO G, WANG G, et al. Investigation on bubble morphological evolution and plastic part surface quality of microcellular injection molding process based on a multiphase-solid coupled heat transfer model[J]. International Journal of Heat And Mass Transfer, 2017, 104: 1246-1258.
- [7] XIAO C, HUANG H, YANG X. Development and application of rapid thermal cycling molding with electric heating for improving surface quality of microcellular injection molded parts[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 478-489.
- [8] SUN X, KHARBAS H, PENG J, et al. A novel method of producing lightweight microcellular injection molded parts with improved ductility and toughness[J]. Polymer, 2014, 56: 102-110.
- [9] YOO Y, WOO S, KIM S. Injection molding without prior drying process by the gas counter pressure[J]. Polymer Engineering and Science, 2012, 52: 2417-2423.
- [10] 李帅, 赵国群, 管延锦, 等. 模具型腔气体压力对微发泡注塑件表面质量的影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 79-85.
LI Shuai, ZHAO Guoqun, GUAN Yanjin, et al. Influence of mold cavity gas pressure on the surface quality of a microcellular injection molding part[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 79-85.
- [11] CHEN H, CHIEN R, CHEN S. Using thermally insulated polymer film for mold temperature control to improve surface quality of microcellular injection molded parts[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(8): 991-994.
- [12] CHEN S, LIN W, CHIEN R, et al. Variable mold temperature to improve surface quality of microcellular injection molded parts using induction heating technology[J]. Advances in Polymer Technology, 2008, 27(4): 224-232.
- [13] HUANG H, TIAN J, GUAN W. Microcellular injection-compression molding (micm): A novel technology for effectively improving cellular structure of polystyrene foams[J]. Polymer Engineering and Science, 2014, 54: 327-335.
- [14] HOU J, ZHAO G, WANG G, et al. A novel gas-assisted microcellular injection molding method for preparing lightweight foams with superior surface appearance and enhanced mechanical performance[J]. Materials & Design, 2018, 127: 115-125.

- [15] BLEDZKI A, KUHN J, KIRSCHLING H, et al. Microcellular injection molding of PP and PC-ABS with precision mold opening and gas counterpressure[J]. Cellular Polymers, 2008, 27: 91-100.
- [16] DONG G, ZHAO G, GUAN Y, et al. Formation mechanism and structural characteristics of unfoamed skin layer in microcellular injection-molded parts[J]. Journal of Cellular Plastics, 2016, 52: 419-439.
- [17] 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.
- [18] HEIM H, TROMM M. General aspects of foam injection molding using local precision mold opening technology[J]. Polymer, 2015, 56: 111-118.
- [19] CHU R, MARK L, JAHANI D, et al. Estimation of the foaming temperature of mold-opening foam injection molding process[J]. Journal of Cellular Plastics, 2016, 52: 619-641.
- [20] WANG G, ZHAO G, DONG G, et al. Lightweight, super-elastic, and thermal-sound insulation bio-based PEBA foams fabricated by high-pressure foam injection molding with mold-opening[J]. European Polymer Journal, 2018, 103: 68-79.
- [21] WANG G, ZHAO G, DONG G, et al. Lightweight, thermally insulating, and low dielectric microcellular high-impact polystyrene (HIPS) foams fabricated by high-pressure foam injection molding with mold opening[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6: 12294-1230.
- [22] ZHAO J, ZHAO Q, WANG L, et al. Development of high thermal insulation and compressive strength BPP foams using mold-opening foam injection molding with in-situ fibrillated PTFE fibers[J]. European Polymer Journal, 2018, 98: 1-10.

作者简介: 董桂伟, 男, 1981 年出生, 工学博士。主要研究方向为微孔塑料成型工艺与技术。

E-mail: gwdong@sdu.edu.cn

赵国群, 男, 1962 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为塑性成形理论、数值模拟方法、模具 CAD/CAM/CAE。

E-mail: zhaogq@sdu.edu.cn

(上接第 34 页)

deformation structures in U-14at.%Nb[J]. Acta Materialia, 2008, 56: 2638-2648.

- [55] 何立峰, 黄海, 杨建雄, 等. U-Nb 合金的可逆塑性变形及其消除方法 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 8(21): 1904-1909.

HE Lifeng, HUANG Hai, YANG Jianxiong, et al. Reversible plastic deformation and elimination method of

U-Nb alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 8(21): 1904-1909.

作者简介: 刘涇源, 女, 1986 年出生, 博士, 工程师。主要研究方向为核材料加工、核材料表面改性、电塑性成形。

E-mail: liujingyuanhit@163.com

崔晓磊(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为流体压力成形理论与技术、高强难变形材料塑性加工。

E-mail: xiaoleicui@hit.edu.cn