

基于化学微发泡工艺的门饰板设计

任晓康

(广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广州 511434)

摘要: 为推进化学微发泡聚丙烯(PP)材料的实际应用,提升汽车轻量化水平,从化学微发泡的材料物性定义、结构设计、CAE仿真模拟和模流分析等方面对化学微发泡PP在汽车车门内饰板上的应用可行性进行探讨,对比了常规注塑和化学微发泡注塑的差异,提出了基于二次开模(Core-back)工艺的化学微发泡产品的结构设计和工艺要求,展望了化学微发泡工艺的应用前景。

关键词: 汽车内饰 聚丙烯材料 化学微发泡 轻量化

中图分类号:U465;U466 文献标志码:B DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250094

Design of Door Panel Based on Chemical Micro-foaming Process

Ren Xiaokang

(GAC R&D Center, Guangzhou 511434)

Abstract: In order to promote the practical application of chemical micro-foaming polypropylene material as a lightweight means, this paper firstly discusses the application feasibility of chemical micro-foaming on door interior panels in terms of material property definition, structural design, CAE simulation and mold flow analysis. Then, differences between conventional injection molding and chemical micro-foaming injection molding are compared. Finally, the structure design and process requirements of chemical micro-foaming products based on core-back process is proposed, and the application of chemical micro-foaming process is prospected.

Key words: Automotive interior, Polypropylene material, Chemical micro-foaming, Lightweight

1 前言

聚丙烯(Polypropylene, PP)作为一种性价比高且综合性能优异的材料,在汽车领域应用广泛。节能减排对汽车轻量化提出了更高要求,PP也成为材料级轻量化的主要对象之一。目前,PP的轻量化路线包括低密度PP、薄壁化、物理微发泡、化学微发泡等,其中,注塑级化学微发泡是通过二次开模(Core-back)工艺,使产品中间层发泡形成微孔结构,从而降低整体密度,达到轻量化效果,相比其他轻量化手段,化学微发泡具有更高的轻量化收益,同时技术难度更高,是目前国

内外材料厂商和主机厂研究的热点。目前,已有关于适合化学微发泡工艺的PP材料研发及Core-back工艺的相关报道^[1-7],但在实际产品开发中,化学微发泡成本偏高,对结构设计、CAE仿真等缺少系统分析。

本文从化学微发泡的材料物性定义、结构设计要求、CAE仿真模拟和模流分析等方面对化学微发泡在门内饰板上的应用可行性进行探讨,并横向对比了常规注塑和化学微发泡注塑之间的差异,提出了基于Core-back工艺的化学微发泡产品结构设计和工艺要求,展望了化学微发泡工艺的应用前景。

作者简介:任晓康(1987—),男,硕士学位,工程师,研究方向为汽车内饰设计。

参考文献引用格式:

任晓康. 基于化学微发泡工艺的门饰板设计[J]. 汽车工艺与材料, 2025(8): 61-66.

REN X K. Design of Door Panel Based on Chemical Micro-foaming Process[J]. Automobile Technology & Material, 2025(8): 61-66.

2 聚丙烯材料的轻量化技术应用

2.1 聚丙烯化学微发泡工艺的优势

聚丙烯在汽车内外饰上的轻量化路线包括低密度 PP、薄壁注塑、物理发泡、化学发泡等工艺,如表 1 所示。其中,化学微发泡在其成型过程中存在二次开模工艺,熔融塑胶在二次开模之前需充满模腔,属于由薄壁注塑衍生的新工艺,如图 1 所示。理论上,将化学微发泡材料更换为低密度 PP(减少改性填料含量),再结合薄壁化工艺和微发泡工艺,能够最大限度发挥化学微发泡的轻量化优势,减重效果可达 30% 以上。

表 1 聚丙烯材料的不同轻量化方案对比

轻量化路线	减重比例/%	工艺限制	行业状态
低密度 PP	8 ~ 10	减重比例小	技术成熟、应用广泛
薄壁化工艺	10 ~ 15	模具成本高,工艺难度较大,产品易翘曲变形、刚强度较低	技术成熟、日系汽车应用较多
化学微发泡	15 ~ 20	模具制造周期长且成本高,后期工艺调试周期长,需额外辅助设备投入	技术和工艺门槛高,应用逐渐兴起
物理微发泡	5 ~ 10	减重比例小,工艺难度大,设备投入成本高,不适用于外观件	非外观骨架上应用较多,如仪表板骨架

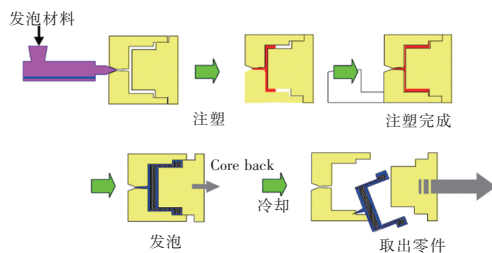


图 1 化学微发泡注塑工艺过程

由图 2 中减重成本比可知,减重会带来一定程度的成本增加,对比常见的材料减重工艺,化学发泡减重成效明显,但成本并未大幅提高。以某车型门饰板为例,相比常规注塑,开模化学发泡使质量减轻 1.2 kg/台,减重效果约 16.4%,成本增加 22.3 元/台。若将该技术拓展到其他部件,减重效果更加显著,如门饰板、仪表板骨架、掀背门、立柱饰板等,预计每件可减重 3 kg 以上。

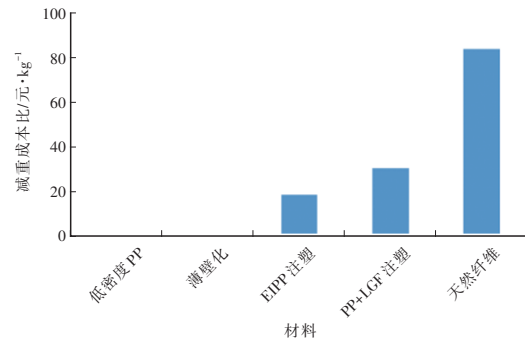


图 2 不同材料减重工艺的成本效益对比

2.2 化学微发泡材料性能

聚丙烯是一种结晶聚合物,其发泡仅能在结晶熔点附近进行,超过熔点后熔体黏度迅速下降、无法成孔,且注塑成型过程中,靠近模腔两侧的熔胶首先降温形成密实结构(极少发泡),中间层继续发泡,最终形成类似三明治的稳定结构(图 3),所以,聚丙烯发泡工艺较为复杂且条件苛刻。

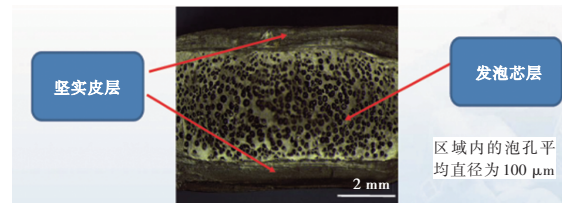


图 3 化学微发泡材料结构

常规聚丙烯直接发泡成型时通常会出现大量并孔、凹陷等缺陷,且力学性能下降,不适合用于发泡成型。为此,研究人员开展了大量工作,希望能找到一种适用于发泡成型的改性聚丙烯材料。

目前,在微发泡方面的报道仅解决了微发泡材料工艺的部分问题,没有系统解决微发泡注塑聚丙烯的所有技术问题^[5,8]。用于汽车注塑零部件微发泡注塑成型的聚丙烯材料必须兼顾材料的可发泡性、流动性、部件外观效果、力学性能、环保性及成本等因素。因此,注塑级微发泡聚丙烯的推广应用,必须系统地解决材料内在属性与材料使用要求之间的矛盾^[5]。

本文对比了当前市面上多款化学微发泡材料的性能。与常规注塑 PP 相比,化学微发泡 PP 的熔融指数需大幅提升,原因为在二次开模工序之前,熔融塑胶需快速充模,材料必须具有良好的流动性。表 2 对比了主流材料厂商适合化学发泡工艺的材料物理性能(发泡前),并给出了相应推荐值。

表2 不同牌号发泡聚丙烯材料的物性对比

材料厂商	密度 /g·cm ⁻³	熔融指数 /g·(10 min) ⁻¹	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /MPa	拉伸强度 /MPa	缺口冲击强度(23 °C) /kJ·m ⁻²
润佳	1.05	49	28.6	1 900	19.1	41
金发	1.04	40	28.1	1 858	19.4	30.2
普利特	1.05	51	26.6	1 840	18.2	36.1
银禧	1.03	47	27.9	1 676	20	11.5
巴塞尔	1.04	37.5	28	1 800	20	39.6
沃特	1.03	41.5	28.5	2 000	18.5	≥35
常规PP	1.03	≥13	≥28	≥1 600	≥16	≥35
发泡PP推荐值	1.03±0.02	≥40	≥28	≥1 800	≥19	≥35

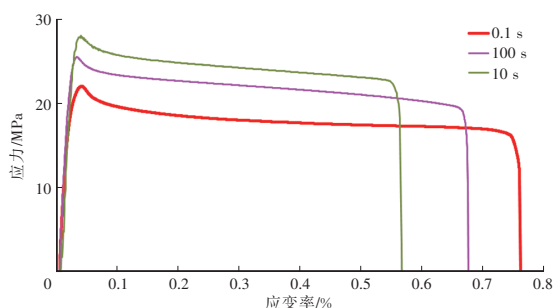
化学微发泡工艺的核心在于通过微发泡形成泡孔均匀分布的三明治结构(图3),这是一种非均质结构,上、下表层为坚实皮层,中间层为发泡芯层。

发泡材料的物理性能参数与常规注塑PP相比存在明显差异,如表3所示,与常规PP相比,发泡材料的密度和弹性模量基本存在40%~50%的降低。

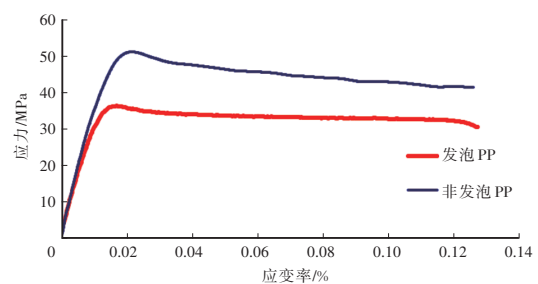
表3 发泡聚丙烯和常规聚丙烯材料的物性对比

材料(发泡后)	弹性模量 /MPa	密度 /kg·m ⁻³	泊松比	断裂延伸率/%
常规PP	1 780	1 030	0.39	35.28
化学微发泡PP	850	650	0.42	25~30

图4为发泡聚丙烯的高速拉伸曲线和塑性应变-应力曲线。随着应变率的增加,曲线的刚度出现未按顺序增加的反常趋势,与传统注塑样件的规律不一致,推测原因:测试样件在不同区域截取,样件不同区域的发泡率不一致,或微发泡样件为非均质材料,拉伸曲线规律与传统均质材料不一致。上述差异导致发泡材料CAE仿真比常规均质PP材料可能存在更大失真。另外,发泡PP材料刚度更低,更易发生应力屈服。



(a) 高速拉伸曲线



(b) 塑性应变-真实应力

图4 发泡聚丙烯的高速拉伸曲线和应力应变曲线

2.3 设计规范

化学微发泡产品结构与常规注塑产品结构存在明显差异,如化学微发泡工艺产品的实际发泡区域仅限于大面区域,在翻边域或与出模方向夹角很小的情况下,发泡程度较小;因工艺限制,背部结构(包括Doghouse或其他加强结构)无法发泡。

化学微发泡产品的设计要素包括发泡前、后的壁厚设计^[9]、分型线位置结构设计、加强结构设计、连接结构设计,具体如表4所示。

表4 化学微发泡产品的设计要素

设计要素	设计要求
产品壁厚 ^[7]	原始厚度通常为1.8~2.0 mm,开模后发泡至2.8~3.0 mm,开模距离控制在1 mm左右;产品结构垂直于脱模方向处的壁厚不可增加,焊筋、Snap结构一般没有发泡
背部结构	背部筋结构不利于A面的表面质量控制,可减少筋位设计;背部筋条高度建议低于3 mm,筋厚建议大端为0.9 mm,拔模角度为2°;产品发泡后强度减弱,在特殊区域可进行加强,如安装面板和扶手的固定结构
产品边界	产品孔洞边缘或者边界位置通常不采用发泡工艺,模具设计时需进行特殊处理以保证壁厚无变化;分型线位置的棱角区域发泡后棱角清晰度降低,可采用R2圆角过渡

2.4 CAE 仿真分析

CAE 仿真对常规均质 PP 材料具有较高的准确度,但对非均质的化学微发泡结构层级,CAE 仿真模型在网格参数化方面需基于三明治结构建立新的模型参数。本文针对非均质材料网格参数化和 CAE 仿真进行模拟,并基于某车型对比了常规均质 PP 材料和非均质化学微发泡 PP 材料产品性能,分别从产品的刚度、强度和侧碰性能方面进行对比,性能对比的位置如图 5 所示。

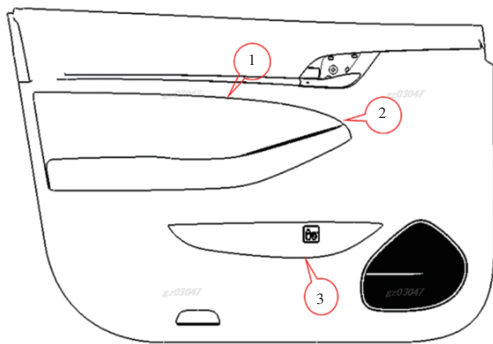


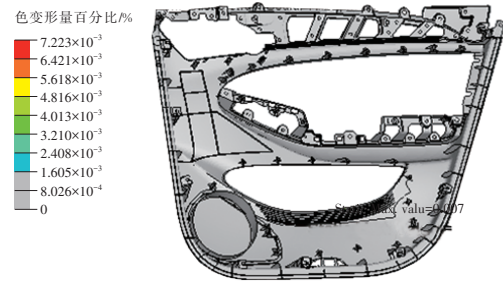
图5 用于CAE仿真的某车型门饰板

a. 刚度工况(表5):相比常规注塑工艺,化学微发泡门板扶手和地图袋刚度下降一倍以上,但刚度变形量仍满足标准;

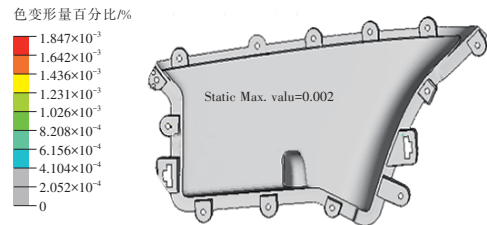
刚度工况	常规注塑	化学微发泡	目标值
位置点1	0.55	1.93	<4
位置点2	1.08	1.91	<2
位置点3	4.83	11.88	<12

b. 强度工况(表6、图6):相比常规注塑工艺,地图袋本体位置在 Y 向 220 N 压力下,位移为 11.88 mm,接近目标值,存在一定的风险,原因为化学微发泡导致材料的塑性变形量增大,但仍小于材料断裂延伸率,可通过提高结构厚度或增加加强筋进行改善。

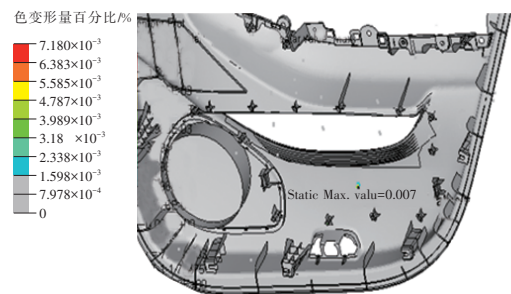
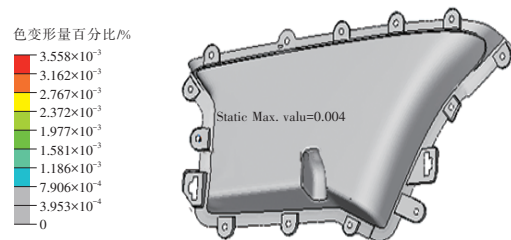
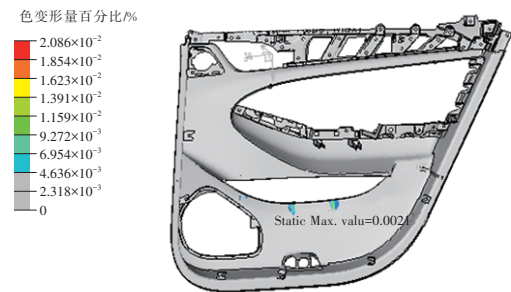
强度工况	区域	常规注塑	化学微发泡	材料断裂延伸率
220 N(拉)	本体	0.70	2.10	35.20
	地图袋	0.20	0.40	35.20
220 N(压)	本体	0.70	7.00	25 ~ 30
	地图袋	0.20	1.60	25 ~ 30



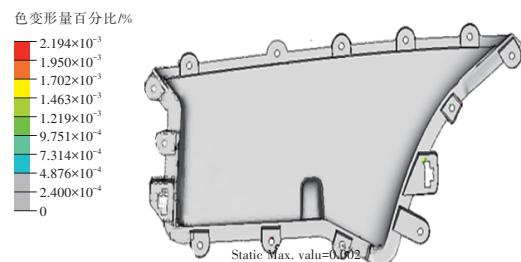
(a)非发泡门饰板(地图袋强度工况:拉222 N)

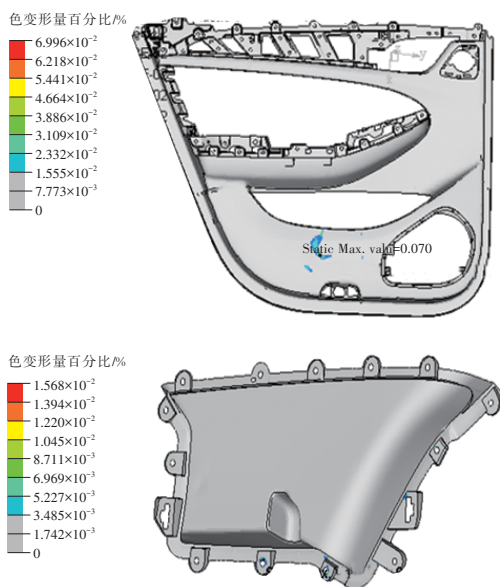


(b)发泡门饰板(地图袋强度工况:拉222 N)



(c)非发泡门饰板(地图袋强度工况:拉222 N)





(d)发泡门饰板(地图袋强度工况:拉222 N)

图6 产品的强度性能对比

c. 冲击侧碰工况:相比于传统注塑,腹部和胸部的冲击反弹力大幅下降50%以上,如表7所示,说明化学微发泡有利于提升产品冲击性能。冲击性能的提升可归因于发泡工艺后材料弹性模量降低,在吸能方面更具有优势。

表7 常规注塑和化学微发泡注塑产品的侧碰性能

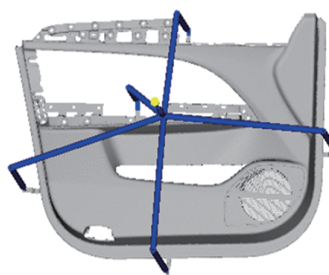
区域	胸部			腹部	
	上点	中点	下点	上点	下点
冲击点坐标(X,Z)	(2 461, 641)	(2 446, 604)	(2 424, 561)	(2 375, 523)	(2 365, 487)
冲击力(常规注塑)/N	5 314	3 990	2 883	3 628	3 122
冲击力(化学微发泡)/N	3 952	3 098	1 851	1 786	1 432
目标力/N	<3 000	<3 000	<3 000	<3 000	<3 000

2.5 模流分析

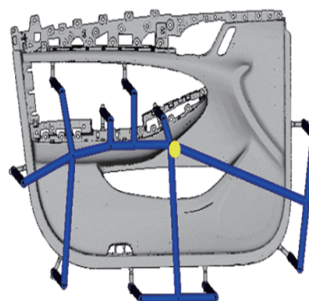
常规PP注塑工艺与化学微发泡PP注塑工艺存在较大的差异,模具需进行特殊设计和前期模流分析,表8列举了常规注塑与化学微发泡注塑工艺的模具参数对比。结果表明:为满足化学微发泡工艺快速充模要求,其浇口数量需为常规注塑的2倍以上(图7),填充时间不足常规注塑的一半,注塑过程中熔融塑胶的前沿流动温差更小。

表8 常规注塑和化学微发泡注塑的模流分析对比

模流分析对比	传统注塑	EIPP注塑
产品壁厚/mm	2.3	1.8(发泡前)
浇口数量/个	5~6	10~11
填充时间/s	5.15	2.06
流动前沿温差/℃	60	31.4
气穴问题	传统注塑模具气穴气体来源于型腔中的空气和原材料中的水分	微发泡注塑除常规的气体来源,发泡过程也会产生许多气体,排气要求更高



(a)常规注塑



(b)化学微发泡注塑

图7 常规注塑和化学微发泡注塑的模流分析

化学微发泡在Core-back之前的工序本质上是薄壁注塑,模腔壁厚(产品壁厚)越小,注塑压力和流动阻力越大,所以要求熔融塑胶具有很高的熔融指数和流动性;同时为提高填充模腔的速度,需要更多的浇口同时进胶,否则塑胶尚未完全填充,材料已开始微发泡,会导致模腔无法充满而成型失败。

另外,为满足工序要求,化学微发泡工艺还需配备性能良好的排气设备和表面温控设备。同时,为满足产品更高的外观要求,还需配备反压充气设备(图8),通过在熔融塑胶的熔体流动前沿区域的腔体内施加一定的外部压力,防止微发泡产生的气体溢出到产品表面,以保证产品的外观质

量,减少气痕等^[1,10]。

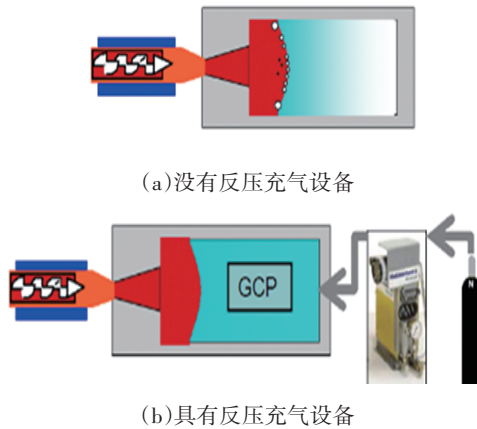


图8 反压充气设备的工作原理

3 结束语

本文从化学微发泡的材料物理性能定义出发,对比了常规注塑工艺与化学微发泡工艺的产品性能,发现化学微发泡整体性能基本满足当前汽车内饰设计要求,且侧碰安全性方面表现更出色,是一种具有良好性能优势的材料级轻量化手段。

目前,化学微发泡在汽车行业有较高的应用潜力,汽车轻量化设计和节能减排要求的不断提高对该工艺起到了显著的助推作用。随着更多的原材料供应商陆续开展化学微发泡材料的研发,原材料成本有望继续下降,同时,随着相关设备的投入以及模具设计能力和工艺水平的提升,化学

微发泡的技术成熟度和质量控制系统将更加成熟,并逐步扩大商业化应用规模,推动汽车行业向更高效、更环保的方向发展。

参考文献:

[1] 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.

[2] 谢紫龙, 唐小红, 张琴, 等. 新能源汽车用聚丙烯基微发泡复合材料[J]. 塑料工业, 2022, 50(6): 49-55+177.

[3] 王精武, 刘扬, 李世刚. 微发泡工艺在乘用车上的应用与前景展望[J]. 汽车文摘, 2024(5): 53-57.

[4] 何宇, 潘筱晨, 许顺雯, 等. 发泡剂在聚丙烯中应用的研究进展[J]. 塑料工业, 2024, 52(9): 19-25.

[5] 王滨, 蒋顶军. 填充剂对聚丙烯微发泡材料性能和外观质量的影响[J]. 塑料, 2018, 47(6): 58-61.

[6] 汪理文, 翁永华, 丁贤麟. 汽车用微孔轻量聚丙烯微发泡材料的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(1): 154-158.

[7] 王惠添, 殷莎, 陈正伟, 等. 微孔发泡注塑技术研究进展[J]. 中国塑料, 2021, 35(10): 154-165.

[8] 谢紫龙, 唐小红, 张琴, 等. 新能源汽车用聚丙烯基微发泡复合材料[J]. 塑料工业, 2022, 50(6): 49-55+117.

[9] 刘臻青. 化学微发泡注塑在汽车门内饰板的应用[J]. 汽车工程师, 2017(4): 47-50.

[10] 卢蒙生. 汽车车门内饰板产品微发泡和气体反压工艺介绍[J]. 科技创新导报, 2018, 15(4): 108+110.