

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.06.012

聚合物剪切流动取向应力-应变关系实验研究^{*}

喻选, 辛勇

(南昌大学机电工程学院, 南昌 330031)

摘要:采用熔体流动速率(MFR)仪研究了聚丙烯(PP)材料在剪切流动中大分子链取向应力与应变关系模型。通过测定口模挤出物胀大比,依据 Poiseuille 定律计算出材料在不同条件下的第一法向应力差;引入相关聚合物充模取向力学行为理论模型,考虑到相关模型表征了聚合物充模的瞬态过程,简化起见,以材料 MFR 代替模型中的应变张量;采用最小二乘与数据拟合理论求得相关模型常量,得出 PP 材料的流动取向应力-应变定量关系式。实验验证结果显示,线弹性模型和高弹性模型的应力最大平均理论误差分别为 11.57% 和 10.95%,最小平均误差分别为 9.60% 和 5.68%,均具有较好的适配性,为后续相关模型理论的定量表征提供了实验依据。

关键词:聚丙烯;剪切流动;流动取向;应力;应变

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)06-0054-05

Experimental Study of Relationship Between Flow-Induced Stress and Strain During Polymer Shear Flow Process

Yu Xuan, Xin Yong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Relationship between flow-induced strain of polypropylene macromolecular chains and flow stress in shear flow process was studied by using melt flow rate tester. The first normal stress difference under different conditions was calculated by the swelling ratio of specimens based on the Poiseuille's law equation. Taking into account the relevant models to characterize the polymer filling transient, material flow rate was used to replace the model strain tensor for simplification, and employed the least-squares to fit the data in order to obtain the constants of the relevant theoretical model. Finally, the quantitative relationship of polypropylene melt flow-induced orientation and flow stress was derived. The verification experimental results show that the theoretical maximum average correlation errors of the models were 11.57% and 10.95% respectively, and the minimum average errors were 9.60% and 5.68% respectively, this indicates that both of the models have good suitability, and thus provided an experimental evidence for the following quantitative characterization of relevant theoretical model.

Keywords: polymer; shear flow; flow-induced orientation; stress; strain

聚合物注射成型可大致分为充模、保压、冷却、脱模四个阶段,充模过程中聚合物缠结成大分子链团在温度较低的模具型腔内发生剪切流动并迅速充满型腔,大分子链团受到压力、温度等因素的影响而发生解缠与取向形变等物理变化,其最终固化形态将对制品最终的宏观及微观力学、热学、光学性能产生重要的影响。理解这一缠结大分子链团流动取向的分子动力学机制,研究并揭示这一聚合物微观形变历史,构建聚合物充模流动取向应力场物理和数学模型,将有助于从理论上对整个充型过程进行分析和控制,实现对整个注射成型过程的工艺控制与制品品质的优化设计,其技术的应用及所提供理论依据为推动聚合物加工技术的发展具有重要的科学意义和应用价值。

目前国内外有关聚合物充模取向问题的研究

较多,主要集中于取向模型的构建与数值模拟与应力预测领域。R. Mendoza 等^[1]通过使用红外光谱和广角 X 射线衍射研究了无定型聚丙烯(iPP)在不同工艺条件下沿厚度方向上大分子链取向的分布情况,发现在厚度方向上剪切层处分子链取向程度最大,而注射速率决定着剪切层的厚度,因而是影响取向沿厚度分布的主要因素。R. Pantani 等^[2]利用楔形法考察了浇口附近和远离浇口处厚度方向上聚苯乙烯(PS)的双折射分布,并通过引入简单黏弹模

^{*} 国家自然科学基金项目(51365038,51565034),江西省科技支撑计划项目(20122BBE500044),江西省高校科技落地计划项目(KJLD12058)

联系人:辛勇,博士,教授,博士生导师,享受国务院特殊津贴专家,主要研究方向为注塑成型新技术及其精密模具数字化设计与制造

收稿日期:2016-03-11

型搭建模拟平台模拟了分子链的取向演化过程,模拟结果与实验均表明保压流动对分子链的取向程度有明显影响。Li X J 等^[3]基于不可压缩黏弹性流动模型,结合 XPP 本构和 Tait 状态方程,采用有限元和有限体积法模拟研究了聚合物三维非等温充模流动应力分布,所得结果表明法向应力差随韦森堡数增高而降低,随保压压力增高而增高。R. Pantani^[4]还利用平板流变仪通过选择合适的应力-光学系数测定了 PS 样品的双折射分布,结果表明所提出的高分子非线性哑铃模型不但能准确解释注射成型时所形成的分子取向而且可以定量表征样品的双折射分布。Y. B. Lee 等^[5]基于应力光弹理论,采用 Leonov 模型预测了中心浇口圆盘注射和注射压缩成型过程中的流动残余应力,得出修正后的应力张量表。K. H. Kim 等^[6]基于非线性黏弹性本构方程结合流动诱导结晶理论得到聚合物的结晶取向方程,从而提出了一种新的模拟半结晶聚合物流动残余应力和双折射方法,通过与聚丙烯(PP)在不同工艺条件下的实验结果对比发现,模拟所预测的结果准确性很高。Lu X 等^[7]通过双折射仪来测定流动诱导取向应力,使用激光干涉仪测定在不同工艺条件下聚碳酸酯光学镜片的表面,并运用统计学方法分析不同工艺参数对注射成型光学镜片表面轮廓的影响,结果表明除了成型收缩率外,流动过程中所产生的流动残余应力也会对镜片的表面轮廓产生影响。K. Kwon 等^[8]利用 PVT 状态方程构建新的非线性黏弹本构方程,通过模拟聚合物分子剪切流动过程,预测了无定型聚合物在不同工艺参数下的成型收缩率和流动残余应力。M. R. Kamal 等^[9]采用了三维数值模拟方法模拟研究了 PS 和高密度聚乙烯材料在注射成型过程中的流动应力残余问题。王艳芳等^[10]利用光弹法研究了 PS 平板制品面内的双折射分布,发现浇口附近双折射值最大,并随着距离浇口位置越远双折射值逐渐减小。韩健等^[11]根据双折射的光弹测试结果分析了 PS 注塑制品分子取向和流动残余应力的分布趋势,并考察了熔体温度和保压压力对制品双折射和流动残余应力的影响,结果表明最大双折射值随保压压力增加和熔体温度降低而升高。陈静波等^[12]利用 Lenovo 本构模型和 Tait 状态方程建立了可压缩黏弹性聚合物熔体在薄壁型腔中充模及保压过程中非等温非稳态流动的数学模型。杨斌鑫等^[13]通过推导出基于黏弹性 XPP 本构关系的能量方程,建立了充模流动的气

-液两相模型,进而求解得到了凝固层和剪切流动速率分布,给出了充模结束时影响制品力学性能的流动诱导残余应力。周华民等^[14]等分析了在薄壳成型过程中产生的残余应力,建立了残余应力计算数学模型,并给出了基于薄层理论的数值求解方法。吴宏武等^[15]采用通用型 PP 的黏流模型在聚合物取向机理理论研究基础上,应用 Moldflow 软件分别模拟了稳态和动态注塑制品皮层和芯层的取向分布。诸多实验或模拟研究均从不同层面对聚合物充模流动取向应力及分布形态进行了研究,且取得了一定的成果。然而由于聚合物流变过程的复杂性,相关研究往往囿于成型工艺条件,很难给出一种普适性的明确合理的解释,或者由于模型求解数值迭代繁琐不易得到统一明确的理论模型或解析式。

笔者在前期研究中,针对缠结大分子链单体在成型充模过程中的无规形变特性,基于熔体可压缩、连续、均匀、无轨行走及仿射运动等一系列简化和假设,以分子论模型理论为基础,结合热力学与统计力学理论,研究得出了与胡克定律具有类似形式的聚合物熔体充模取向应力场线弹性及高弹性理论模型。现在前期研究的基础上,采用实验的方法,以 PP 为原材料,引入熔体流动速率(MFR)仪模拟熔体剪切流动过程,通过对相关参数设定与测定,结合数据处理技术,得出相关理论模型的定量表征,为聚合物充模取向行为关系模型理论的进一步深入研究提供了实验依据。

1 聚合物熔融流动取向行为测定理论

聚合物注射成型的充模过程是非牛顿型塑料熔体在高压作用下的非等温、非稳态流动过程,基于连续介质假设和分子动力学的理论基础,从微观角度研究大分子链在充模时受温度场和压力场的变化来描述其充模时的流动力学特征和变化过程,能够将聚合物材料的微观结构与宏观力学性能关联起来。根据流体在圆管内流动的 Poiseuille 定律^[16]和流出口模时的挤出胀大现象,利用 MFR 仪测得聚合物熔体在不同条件下通过口模时的剪切应力和法向应力,相关计算公式如下:

$$\tau_w = \frac{RP}{2L} \quad (1)$$

$$\sigma = 2\tau_w(B^4 + 2B^{-2} - 3)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: τ_w ——剪切应力, MPa;

σ ——第一法向应力差, MPa;

R ——口模半径, mm;

P ——压力, Pa ;
 L ——口模高度, mm ;
 B ——胀大比。

在前期相关模型理论的研究过程中,针对聚合物成型充模工艺特点,以聚合物缠结大分子链团为研究对象,基于简化与假设并从分子动力学角度结合热力学微熵理论,研究得出了聚合物充模取向形态与应力之间的理论关系见下式。

线弹性模型:

$$\sigma = \varphi K_B T C^{-1} \tag{3}$$

高弹性模型:

$$\sigma = \zeta K_B T e^{(C^{-1}-\varphi)} (C^{-1} - 3) + \delta K_B T e^{-\varphi} \tag{4}$$

式中: σ ——聚合物微元取向应力, kPa ;

φ, ζ 和 δ ——与材料有关的常数;

C^{-1} ——聚合物微元单位时间内取向应变张量;

K_B ——玻尔兹曼常数,为 1.38×10^{-23} J/K ;

T ——热力学温度, K。

需要说明的是,式中聚合物微元应变张量 C^{-1} 表示熔体微元在一个时间单位内的应变大小,考虑到实验条件的限制,在实验测量过程中,为简化起见由单位时间的 MFR 代替。

2 实验与测试

2.1 原材料

PP : J560S, 物 性 参 数 见 表 1, 韩 国 Lotte Chemical 公司。

表 1 PP J560S 的物性参数

项目	测试方法	指标值
熔体密度 / (g · cm ⁻³)	ASTM D-792	0.726 7
固体密度 / (g · cm ⁻³)	ASTM D-792	0.909 6
拉伸强度 / MPa	ASTM D-638	29
弯曲弹性模量 / MPa	ASTM D-790	1 270
剪切弹性模量 / MPa	ASTM D-790	420
最大剪应力 / MPa	ASTM D-256	0.26
熔点 / °C	ASTM D-648	140
注射温度范围 / °C	ASTM D-648	200 ~ 280
MFR / [g · (10 min) ⁻¹]	ASTM D-1238	18

2.2 仪器及设备

MFR 仪: μ PXRZ—400C 型, 口 模 直 径 2.095 mm, 吉林大学科教仪器厂;

游标卡尺: SF2000 型, 桂林广陆量具厂;

干燥箱: DHG-9203(S) 型, 嘉兴市中新仪器有限公司。

2.3 试样制备

考虑到所使用的 PP 在空气中有一定的吸湿性, 为避免水分对实验结果产生不良影响, 需要在实验

前先对原料进行干燥处理, 干燥条件: 80 °C 下烘干 60 min。熔融测试过程中, 采用单因素实验法, 依次测定在 190, 200, 210, 220, 230 °C 条件下, 砝码载荷由小到大依次为 0.325, 1.00, 1.20, 2.16, 3.80, 4.35, 5.25, 6.45 kg 时 (对应的样条编号依次为 1[#]~8[#]) 的 MFR 与样品直径。实验设定为自动取样, 考虑到温度及压力大小引起聚合物材料熔体流动性差异, 在具体取样过程中对取样时间加以适当调整以获得均匀合适的实验样条。计时开始自动切取试样后舍弃第一根样条, 并连续自动切取 3 条均匀无气泡样条, 空冷 2 h 以上作为最终测试试样, 测试结果取 3 条样条的平均值。实验规划见表 2。

表 2 不同测试温度下试样的取样时间

温度 / °C	试样编号							
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
190	30	12	10	8	3	2	2	2
200	20	12	10	5	3	2	2	2
210	20	12	10	5	2	2	2	2
220	20	12	10	5	2	2	2	1
230	20	12	10	5	2	2	2	1

2.4 实验结果

通过测量试样长度并取平均值作为样品最终挤出长度, 进而计算得出单位时间内的应变速率; 测定样条直径并取平均值作为各次实验的最终直径, 通过与口模直径比较, 按照上述公式计算得出 PP 材料在不同工况下的胀大比, 进而计算得出第一法向应力差值。相关数据见表 3。

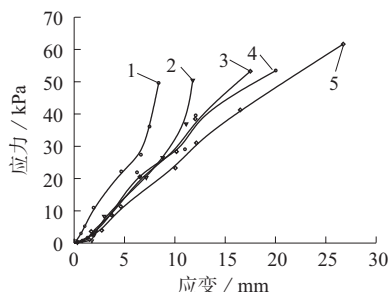
表 3 实验结果数据

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
单位时间应变 / mm	190 °C	0.19	0.69	1.06	1.95	4.69	6.65	7.52
	200 °C	0.312	1.77	2.02	3.00	7.17	8.80	11.13
	210 °C	0.34	1.52	1.69	3.76	6.53	10.17	12.03
	220 °C	0.35	1.34	2.16	3.72	6.25	11.02	12.08
	230 °C	0.79	1.80	2.74	4.64	10.05	12.13	16.50
第一法向应力差 / kPa	190 °C	0.59	2.96	5.18	10.92	22.15	27.34	36.08
	200 °C	0.18	0.70	2.59	8.28	20.31	26.49	36.94
	210 °C	0.20	1.06	3.63	8.62	20.56	28.33	38.49
	220 °C	0.40	1.68	3.71	8.69	21.91	29.04	39.52
	230 °C	0.66	2.64	3.98	11.34	23.26	31.03	41.25

3 数据拟合与模型分析

3.1 线弹性模型

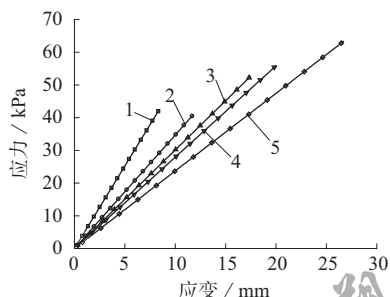
根据实验测得 PP 材料在不同温度时的第一法向应力差与瞬时应变 (剪切速率) 数据作图, 见图 1。由图 1 可以看出, PP 熔体在流动过程中应力与应变呈线性相关, 表明在注射充模初期较短的一段时间内 PP 熔体的大分子链团的弹性效应大于黏性效应, 宏观上表现为剪切流变关系基本服从胡克定律。



熔体温度: 1—190℃; 2—200℃; 3—210℃; 4—220℃; 5—230℃

图1 线弹性模型下 PP 熔体充模流动应力-应变实验曲线

进一步,将相关数据代入公式(3),基于最小二乘法和数据拟合理论,由 Origin 绘图软件拟合得到各温度下的线弹性模型拟合曲线,见图2,对应的模型常数 ϕ 值见表4。



熔体温度: 1—190℃; 2—200℃; 3—210℃; 4—220℃; 5—230℃

图2 线弹性模型下 PP 熔体充模流动应力-应变拟合曲线

表4 不同温度下 PP 材料线弹性模型常数

项目	温度 / °C				
	190	200	210	220	230
模型常数 ϕ	7.90×10^{-26}	5.32×10^{-26}	4.52×10^{-26}	4.10×10^{-26}	3.41×10^{-26}

3.2 高弹性模型

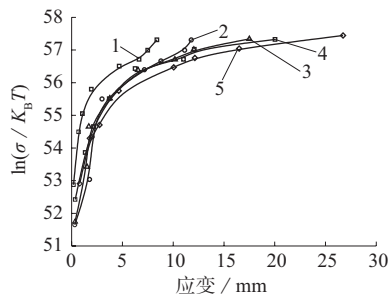
为便于求解,需要对公式(4)进一步简化,其中 $e^{C^{-1}-\phi}$ 因 C^{-1} 远小于 ϕ 可简化为 $e^{-\phi}$,如式(5)所示:

$$\sigma = [\zeta(C^{-1} - 3) + \delta] K_B T e^{-\phi} \quad (5)$$

两边求对数,并整理可得:

$$\phi \ln \frac{\sigma}{K_B T} = \ln[\zeta(C^{-1} - 3) + \delta] \quad (6)$$

将实验数据代入简化后的式(6),即可得到高弹性模型曲线,如图3所示。从图3可以看出,PP熔



熔体温度: 1—190℃; 2—200℃; 3—210℃; 4—220℃; 5—230℃

图3 高弹性模型下 PP 熔体充模流动实验曲线

体在流动初期其取向应力与变形速率基本呈线性关系,随着充模时间的延长,二者又表现出非线性高弹特性。这与聚物流变特性基本符合,进一步从数据上说明该公式在表征聚合物充模取向问题时具有其科学性与合理性。

基于最小二乘法和数据拟合理论,由 Origin 软件拟合得到不同温度下的模型常数,见表5,从而实现了该模型的定量化表征。

表5 不同温度下 PP 材料高弹性模型常数

项目	温度 / °C				
	190	200	210	220	230
模型常数 $\zeta / (\times 10^{26})$	8.08	5.98	4.79	4.19	3.49
模型常数 $\delta / (\times 10^{26})$	1.17	6.98	3.22	7.37	1.22

3.3 理论验证

在上述理论计算的基础上,选取三组温度 200, 210, 220℃, 砝码载荷按照由小到大依次为 2.45, 3.225, 3.61, 3.80, 4.10, 5.00 kg, 进行重复实验,并将所得实验数据代入模型公式(3)和公式(4),其应力理论计算值与实验测定值比较分别见表6和表7。

表6 线弹性模型应力实验与理论计算结果比较

项目		砝码载荷 / kg					
		2.45	3.225	3.61	3.80	4.10	5.00
200℃	计算值 / kPa	2.634	4.453	5.286	5.882	6.805	8.999
	实验值 / kPa	2.625	4.500	4.700	5.000	6.583	7.333
	误差 / %	0.36	1.04	12.47	17.64	3.37	22.72
	平均误差 / %	9.60					
210℃	计算值 / kPa	2.645	4.152	6.364	6.536	7.888	10.454
	实验值 / kPa	3.063	4.800	5.630	6.100	8.500	9.100
	误差 / %	13.63	13.50	13.03	7.14	7.21	14.88
	平均误差 / %	11.57					
220℃	计算值 / kPa	2.885	4.726	5.893	7.786	8.757	11.729
	实验值 / kPa	3.458	6.667	6.767	8.333	9.000	11.750
	误差 / %	16.57	29.11	12.91	6.57	2.70	0.18
	平均误差 / %	11.34					

表7 高弹性模型应力实验与理论计算结果比较

项目		砝码载荷 / kg					
		2.45	3.225	3.61	3.80	4.10	5.00
200℃	计算值 / kPa	2.344	3.962	4.703	5.233	6.054	8.006
	实验值 / kPa	2.625	4.500	4.700	5.000	6.583	7.333
	误差 / %	10.71	11.97	0.06	4.66	8.04	9.17
	平均误差 / %	7.44					
210℃	计算值 / kPa	2.700	4.564	5.418	6.029	7.562	9.224
	实验值 / kPa	3.063	4.800	5.630	6.100	8.500	9.100
	误差 / %	11.82	4.91	3.76	1.16	11.04	1.37
	平均误差 / %	5.68					
220℃	计算值 / kPa	2.823	5.542	5.767	7.618	8.569	11.477
	实验值 / kPa	3.458	6.667	6.767	8.333	9.000	11.750
	误差 / %	18.36	16.87	14.78	8.58	4.79	2.32
	平均误差 / %	10.95					

由表6可知,实验值与理论值之间的最小误差出现在熔体温度为 220℃、砝码载荷为 5.0 kg 时,误

差值为 0.18% ;最大误差出现在熔体温度为 220℃、砝码载荷为 3.225 kg 时,误差值为 29.11%,远远大于其他实验误差值。究其原因,应该是由于温度上升熔体流经口模时剪切速率较大,而负荷值又相对较小。导致在相同取样时间内,较小的样品因实验取样时的人为误差而出现较为明显的波动;但是即便将其考虑在内,所有实验结果的平均误差值也均在 10% 左右,且局部最小误差仅有 0.18% 或 0.36%,说明该模型相对合理。

由表 7 可知,实验值与理论值之间的最小误差出现在熔体温度为 200℃、砝码载荷为 3.61 kg 时,误差值为 0.06% ;最大误差出现在熔体温度为 220℃、砝码载荷为 2.45 kg 时,误差值为 18.36%。因为高弹性理论模型是基于不可压缩熔体假设和应变张量的简化,因此与实验测得值将不可避免出现偏差。但即便是实验加载或数据测量过程中出现了误差,在不同温度下的实验平均误差最大为 10% 左右,最小仅有 5% 左右,且局部最小误差仅有 0.06%,同样也能说明该模型在表征该工程问题方面的相对合理,且比线弹性模型具有更高的精确度。

4 结论

以 PP 为实验材料,通过熔体流变实验测定口模流出物胀大比,引入 Poiseuille 方程计算得到材料在不同条件下的第一法向应力差,以 MFR 代替模型中瞬时应变张量以简化研究,并结合最小二乘理论以处理实验数据,进而得到并确定了相关模型的常量参数。通过实验提取相关计算数据,验证了相关模型的科学与合理性,为聚合物充模取向行为的理论表征提供了简便且高效的实验技术与方法。

参考文献

- [1] Mendoza R, Régner G, Seiler W, et al. Spatial distribution of molecular orientation in injection molded iPP: Influence of processing conditions[J]. *Polymer*, 2003, 44(11): 3363–3373.
- [2] Pantani R, Sorrentino A, Speranza V, et al. Molecular orientation in injection molding: Experiments and analysis[J]. *Rheologica Acta*, 2004, 43(2): 109–118.
- [3] Li X J, Jie O Y, Li Q, et al. Simulations of a full three-dimensional packing process and flow-induced stresses in injection molding[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 126: 1532–1545.
- [4] Pantani R. Validation of a model to predict birefringence in injection molding[J]. *European Polymer Journal*, 2005, 41(7): 1484–1492.
- [5] Lee Y B, Kwon T H. Modeling and numerical simulation of residual stresses and birefringence in injection molded center-gated disks[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 111(1): 214–218.
- [6] Kim K H, Isayev A I, Kwon K, et al. Modeling and experimental study of birefringence in injection molding of semicrystalline polymers[J]. *Polymer*, 2005, 46(12): 4183–4203.
- [7] Lu X, Khim L S. A statistical experimental study of the injection molding of optical lenses[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113(1–3): 189–195.
- [8] Kwon K, Isayev A I, Kim K H. Toward a viscoelastic molding of anisotropic shrinking in injection molding of amorphous polymers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, 98(5): 2300–2313.
- [9] Kamal M R, Lai-Fook R L, Hernandez-Aguilar J R. Residual thermal stresses in injection moldings of thermoplastics: A theoretical experimental study[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42(5): 1098–1114.
- [10] 王艳芳, 赵晓, 刘岩. 聚苯乙烯平板制品双折射行为的实验研究[J]. *现代制造技术与装备*, 2013(1): 28–30.
Wang Yanfang, Zhao Xiao, Liu Yan. Polystyrene plate products birefringent behavior experimental study[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2013(1): 28–30.
- [11] 韩健, 刘春太, 杜云海, 等. 注射成型聚苯乙烯制品双折射的光弹测试与分析[J]. *中国塑料*, 2008(1): 81–85.
Han Jian, Liu Chuntai, Du Yunhai, et al. Measurement and analysis of birefringence distribution in injection molded polystyrene parts by photoelasticity method[J]. *China Plastics*, 2008(1): 81–85.
- [12] 陈静波, 申长雨, 刘春太, 等. 聚合物注射成型流动残余应力的数值分析[J]. *力学学报*, 2005, 37(3): 272–279.
Chen Jingbo, Shen Changyu, Liu Chuntai, et al. Polymer injection molding flow numerical analysis of residual stresses[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, 37(3): 272–279.
- [13] 杨斌鑫, 欧阳洁. 黏弹性熔体充模流动诱导残余应力模拟[J]. *物理学报*, 2012, 61(23): 234–602.
Yang Binxin, Ouyang Jie. Viscoelastic melt filling flow-induced residual stresses simulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 234–602.
- [14] 周华民, 奚国栋, 李德群. 玻壳压制成型中残余应力的数学建模与模拟方法[J]. *中国科学: E 辑*, 2007(3): 409–421.
Zhou Huamin, Xi Guodong, Li Dequn, et al. Mathematical modeling and Simulation of residual stresses in bulb pressing molding[J]. *Science in China: Series E*, 2007, 37(3): 409–421.
- [15] 吴宏武, 高军. 聚合物注塑制品的取向研究[J]. *材料导报*, 2007, 21(8): 59–62.
Wu Hongwu, Gao Jun. A study on the orientation of injection plastic products[J]. *Materials Review*, 2007, 21(8): 59–62.
- [16] Volobuev A N, Tolstonogov A P. Viscous fluid flow in an elastic pipeline[J]. *Russian Aeronautics*, 2008, 51(4): 369–376.