http://pmse.scu.edu.cn

复合注射成型对不同成型结构单聚合物复合材料制件性能的影响

鲁 勇，王 琛，刘心泳

（宁波大学 机械工程与力学学院 智能制造工程研究院 浙江省零件轧制重点实验室，浙江 宁波 315211）

摘要：文中采用复合注射成型技术，通过调整成型参数，制备了具有不同结构的自增强聚合物复合材料(IMSR-SRCs parts)，并对其微观形貌进行了观察。结果表明，半开式IMSR-SRCs制件的拉伸强度与封闭式常规制件相比平均提高了16.89%，且两者的拉伸性能均优于IMSR-SRCs制件，最大提高了14.42%。IMSR-SRCs制件呈现双“皮芯”结构，皮层面积占比高于常规制件，半开式比封闭式IMSR-SRCs制件高5.48%。拉伸性能与皮肤面积的面积比正相关。在偏光显微镜融合位置的表层结构上通过扫描电镜观察到'shish-kebab'结构。广角X射线衍射分析结果表明，2种IMSR-SRCs制件的结晶度没有显着差异，均低于常规制件，最大减量为19.32%，拉伸性能与结晶度的变化呈负相关。2种结构的分子取向均高于常规制件，半开式IMSR-SRCs具有更高的取向，最大提升34.11%。分子取向与IMSR-SRCs制件的拉伸性能呈正相关。通过响应面法，得知分子取向是影响IMSR-SRCs制件性能的决定性因素。此外，通过最小二乘法最小化程序，建立了成型参数、微观形貌和力学性能之间的无量纲方程，初步实现了基于成型参数对IMSR-SRCs制件力学性能的预测。

关键词：复合成型；自增强；皮芯结构；性能预测

中图分类号：TB33 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）04-0096-09

随着环境污染问题和资源浪费问题的日益加重，材料的重复利用成为材料设计的主要问题之一。单组分自增强制件中基体与增强体为同种聚合物材料，由于单组分聚合物复合成型制件的基体和增强体具有同样的化学成分，不存在常规复合成型材料中2种异相物质不相容或相融性不好的问题，具有良好的融合界面及融合强度，降低了界面对整体性能的削弱作用，提高了力学性能[1~4]。与传统的树脂基复合成型材料相比，通过加热熔融可以使单组分自增强制件回收并再利用，避免资源浪费，适应了社会对于环保的要求，保持社会的可持续发展。常规单组分自增强制件的制备主要是通过对基体材料进行改性，使基体材料与增强体的熔点温度产生差异，基体和增强熔体采用同种材料，通过热压、浸渍等手段将熔融或半熔融的基体材料与增强体复合成为一体。这种方法容易对尺度较小的增强体组织性能造成损害，材料性能不稳定，不利于制品性能的调整。同时，对于结晶和半结晶聚合物而言，可以有意识地使聚合物生成直链晶体结构或构造刚性取向结构作为材料本身的增强相，以改善材料的力学性能[5]。本文针对单组分聚合物成型所面临的问题，实现单组分自增强制件性能的可调控成型，提出将二次注射成型与微注射成型技术相结合的复合注射成型技术，制备单组分聚合物复合材料制件[6~8]。

本文以聚丙烯为原料制备具有自增强特性的单组分聚合物复合材料制件（IMSR-SPCs）。首先制备基体，然后用共注成型法在基体上制备填充增强体，预留特定尺寸的通道，以获得完整的制件。同时，通

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0231
收稿日期：2024-04-06
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51475071)
通讯联系人：鲁勇，主要从事高分子成型加工技术研究，E-mail: luyong@nbu.edu.cn

过调整成型参数和成型结构,改变熔体在基体流道中的流变特性,从而获得具有不同力学性能的IMSR-SRCs制件,该技术的优点是无需对基体材料和纤维材料进行改性,只使用传统的注塑机和相关模具实现IMSR-SRC制件的制备。然后,通过力学、光学和X射线衍射等实验表征了不同成型参数的力学性能和微观形貌数据。进一步,采用结构化统计方法,通过方差分析和响应面分析方法,研究分析了各种成型变量对材料的微观相貌及力学性能的影响,并确定了最重要的成型变量及其相互作用关系,最后用最小二乘法对相关实验数据进行拟合,拟合方程中的参数是无量纲的,以获得相关的参数的无量纲方程,目的是建立成型参数对IMSR-SPCs影响的机理模型,客观分析其机理,找出与力学性能密切相关的因素,利用最小二乘法建立成型参数、微观形貌和力学性能之间的无量纲方程,初步实现基于成型参数对IMSR-SPCs制件力学性能的预测,为IMSR-SPCs制件性能的"可调性"提供理论支持。

1　实验部分

1.1　实验原料

采用大连西太平洋石化公司提供的聚丙烯(T30S)制作制件。固体颗粒密度(ρ_s)为0.9 g/cm^3,物料熔体的实际密度(ρ_m)相当于固体颗粒密度。PP的熔体流动指数(MFR)为2.4 g/10 min(测试温度230 ℃)。相对分子质量为3.1×10^5,多分散性指数(M_w/M_n)为3.64。

1.2　试样制备与成型参数

使用大连西太平洋石化公司生产的T30S级聚丙烯(PP)生产哑铃制件。Fig. 1显示了用于拉伸测试的试样的轮廓和增强相的横截面,Fig.1(a)显示了封闭的IMSR-SPC制件,Fig.1(b)显示了半开式IMSR-SPC制件,以及微米范围内的尺寸和公差[9,10]。所有制件均在德国生产的BOY-12A精密微注塑机上进行注塑。成型工艺如下。首先,将PP注入带有型芯或凹槽的基体腔嵌镶块,得到具有预制型腔道结构的PP基体。然后,用增强体镶块替换基体镶块。之后,改变注射成型参数,将制备好的预制件放入增强体镶块的型腔中,最后通过二次注射成型(复合注射成型)将基体凹槽填充聚丙烯,得到具有增强相的SRC制件。为了验证自增强效果,制备了无增强的对比试样。制件成型参数如Tab.1和Tab.2所示。

1.3　测试与表征

1.3.1　拉伸性能测试:为探究IMSR-SRCs制件成型结构与力学性能的关系,在广东MTS系统有限公司生产的微机控制万能试验机SANS-CMT4202上,进行了用于研究力学性能的重复拉伸强度试验。在实验中,拉伸过程由位移控制,拉伸速度为3.0 mm/min。Tab.2中各组自强件的拉伸强度在试验后取平均值,并与按Tab.1参数制备的常规件进行比较。每组试验不少于5次。

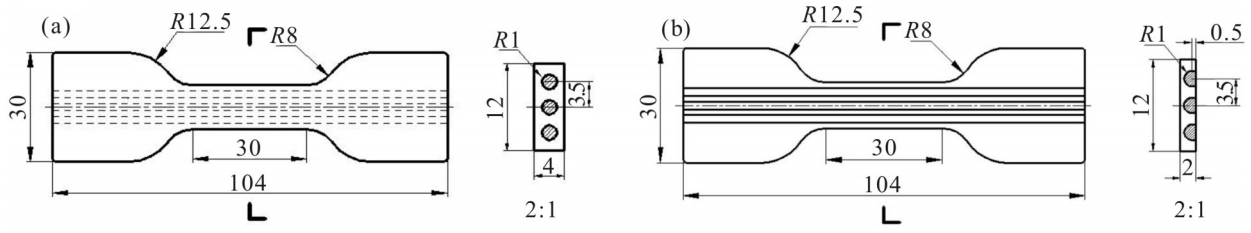


Fig. 1 Co-injection self-reinforced PP specimen: contour profile of the specimen and cross-section of the reinforced phase
(a): co-injection molding structure; (b): semi-open IMSR-SPCs parts

Tab. 1 Molding conditions of IMSR-SRCs parts matrix and conventional parts

Molding processing variable	Fixed variables
Mold temperature: 50 ℃	Injection pressure: 60 MPa
Plasticizing temperature: 220 ℃	Holding pressure: 60 MPa
Injection speed: 120 mm/s	Holding time: 2 s

Tab. 2 Scheme of experimental design

Molding processing variable	Fixed variables
Mold temperature: 30~90 ℃ at 30 ℃ interval	Injection pressure: 70 MPa
Plasticizing temperature: 200~260 ℃ at 30 ℃ interval	Holding pressure: 60 MPa
Injection speed: 12~72 mm·s^{-1} at 12 mm·s^{-1} interval	Holding time: 2 s

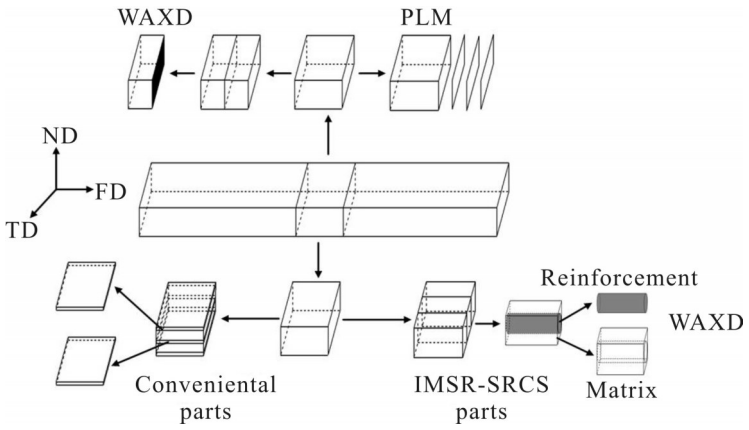


Fig. 2 Sampling diagram of different analysis methods

1.3.2 偏光显微镜分析：使用的设备为江南永新光学有限公司生产的PM6000型透反偏光显微镜（PLM）。利用偏光显微镜对2种试件的切片进行观测，并分析材料的结晶状态和截面形貌。取样区位于样品的中间区域，切片厚度30 μm，切片位置如Fig.2所示。

1.3.3 广角X射线衍射分析（WAXD）：在荷兰的Parnaco公司生产的Empyrean X射线衍射仪上进行WAXD分析。使用的波长为0.1548 nm，样品与检测器的距离为220 mm。通过Mar CCD 165 X射线探测器系统每180秒记录2D WAXD图案。放置样品，其取向（流动方向）垂直于光束。本文给出的所有2D-WAXD模式都是在背景中提取的，因此可以在不同样本之间进行定性比较。 Fit2D软件包用于分析2D-WAXD模式。采样区如Fig.2所示。

结晶度（χ_c）也是根据WAXD图确定，一般结晶性高聚物样品的X射线衍射谱中,在衍射曲线上既有尖锐峰又有比较平的弥散峰,说明不是100%结晶。根据Hermans-Weidinger方法[11,12]计算得到结晶度的计算公式，用衍射线的线图作结晶度的定量计算，由式(1)表示

$$\chi_c = \frac{\varphi_c}{\varphi_c + \varphi_a} \tag{1}$$

$$\varphi_c = N_1 S_{cryst} \tag{2}$$

$$\varphi_a = N_2 S_{amorp} \tag{3}$$

式中：φ_c——结晶峰强度；φ_a——非晶峰强度；N_1和N_2——衍射峰修正系数；S_{cryst}——修正前结晶峰的面积；S_{amorp}——修正前非晶峰的面积。

K_c为产物中β晶体的相对含量，其计算方法如式(4)所示

$$K_c = \frac{I_{300}}{I_{300} + I_{110} + I_{040} + I_{130} + I_{111}} \tag{4}$$

式中：I_{300}——β(300)平面在2θ=16.25°衍射角处的衍射强度，I_{110}，I_{040}，I_{130}和I_{111}——分别为α(110)，α(040)，α(130)和α(111)平面在2θ=14.07°，16.85°，17.50°和21.22°衍射角处的衍射强度，在该研究中用相应峰的积分面积表示。

通过计算θ~2θ扫描的相对峰强度的3个取向指数n_{110}，n_{130}和n_{040}来评估分子取向度(Ω_n)。这些指标与流动方向上的微晶取向有关。对于高度取向的样品，n=1; 否则n<1。I_{hkl}是对应的晶面(hkl)的峰高(或衍射强度)。将分子取向度评估为多个取向指数之间的平均值，如式(5)所示

$$\begin{cases} \Omega_n = \dfrac{n_{110}+n_{130}+n_{040}}{3} \\ n_{hkl} = \dfrac{I_x}{I_{hkl}+I_{111}+I_{131}+I_{041}} \end{cases} \quad (5)$$

2　结果与讨论

2.1　力学特性

拉伸试验结果分析表明,2种结构的IMSR-SRCs制件在不同成型参数下的平均拉伸强度均高于相应结构的常规件(封闭式常规件为33.35 MPa,半开式常规件为34.29 MPa),增加幅度在6.33%~14.42%之间,如Fig.3和Fig.4所示。

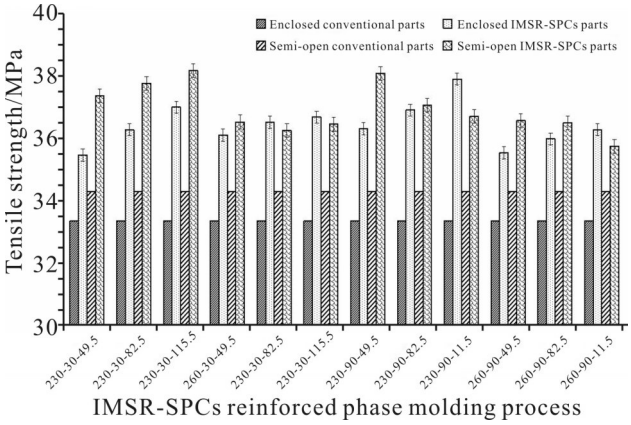


Fig. 3　Tensile strength of IMSR-SRCs parts with different molding structures

证明IMSR-SRCs制件具有自增强特性,即在不改变材料成分和整体结构的情况下,制件的整体性能可通过改变成型方法来提高。同时,通过对比2种结构件的拉伸强度增长比可以看出,半开式IMSR-SRCs制件的拉伸强度整体增幅高于封闭式IMSR-SRCs制件,平均增长16.89%。为了阐明制件的成型结构对其拉伸强度变化的影响,将制件的宏观物理性能与微观形貌特征关联起来,找出与性能变化密切相关的因素,从而为单组分聚合物复合材料的性能调控提供理论依据。

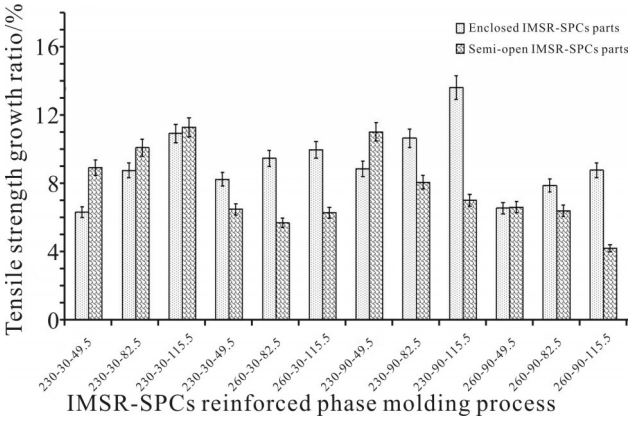


Fig. 4　Tensile strength growth ratio of IMSR- SRCs parts with different molding structures

2.2　微观形貌

Fig.5显示了作为对比的常规制件的显微照片。根据PLM观察,常规制件显示典型的皮芯形态,包括深色皮层区域(包括凝结层、过渡层和剪切层)和亮白色且显示颗粒状结构的芯层区域。

Fig.6显示了2种类型IMSR-SPCs制件在不同成型参数下拉伸轴对称制件的微观形态。由于基体和增强体均显示为“皮芯”结构,因此IMSR-SPCs制件显示为双“皮芯”结构。

从图中可以看出,塑化温度的变化是决定增强体形状变化的主要因素。随着塑化温度的升高,增强体的皮层率降低,增强体的形貌趋于不规则。随着模具温度的升高,增强层形成的皮层面积变化不大,但与其接触的基材表层重熔形成的皮层面积占比逐渐减小,使整体制件皮层面积变化趋势和模具温度变化呈现负相关性。随着注射速度的增加,基体和增强体的皮层面积占比没有明显的规律性变化,但填充熔体对基体的剪切作用增强,使得增强体的形状越来越不规则。综上所述,可以看出,聚合物

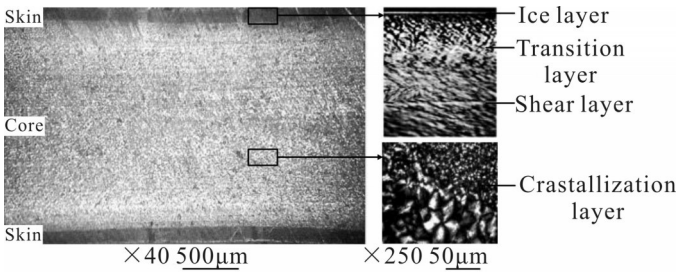


Fig. 5　Section morphology of conventional molding parts

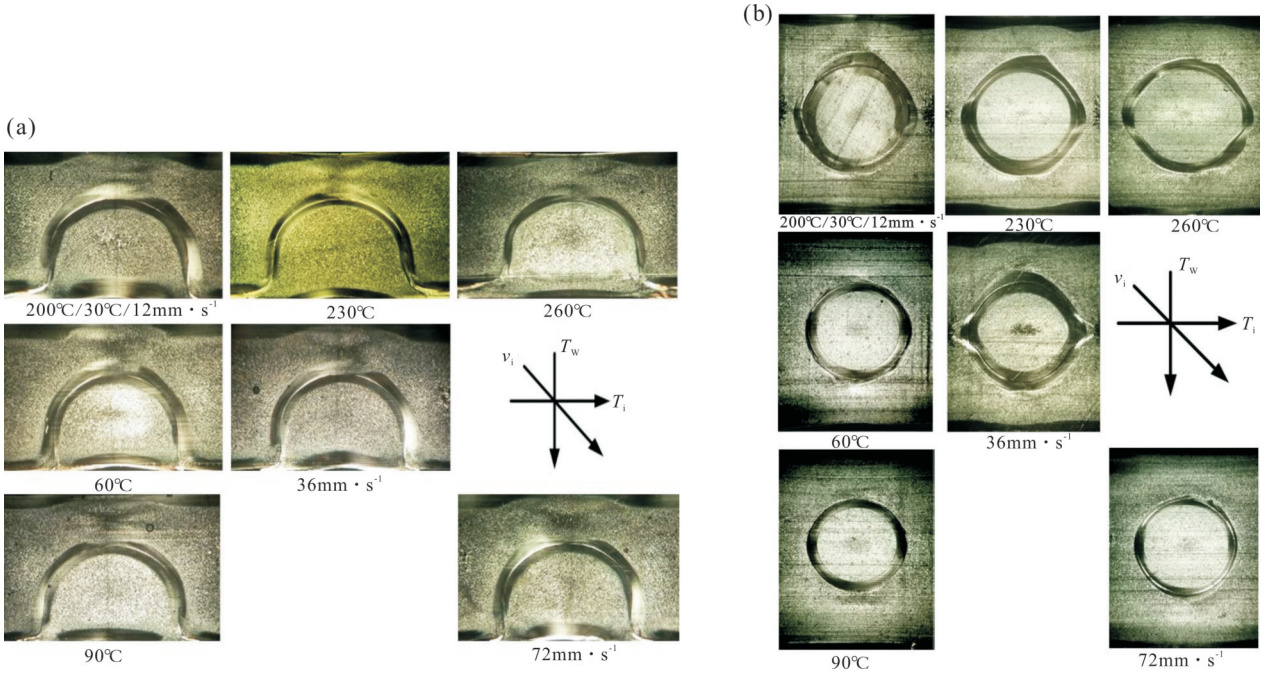


Fig. 6 Micro-morphology of the tensile axi-symmetric parts with different molding structures (the arrows at lower right corner show the direction of increasing of each signed molding parameters)
(a): semi-open IMSR-SPCs parts; (b): enclosed IMSR-SPCs

自增强的效果与增强熔体填充基体流道后形成的形态特征密切相关。为了分析其作用的内在规律，对不同成形结构的IMSR-SPCs皮层占比进行了数据处理和对比分析，分析了IMSR-SPCs皮层面积占比与其力学性能的关系。结果如Fig.7所示。

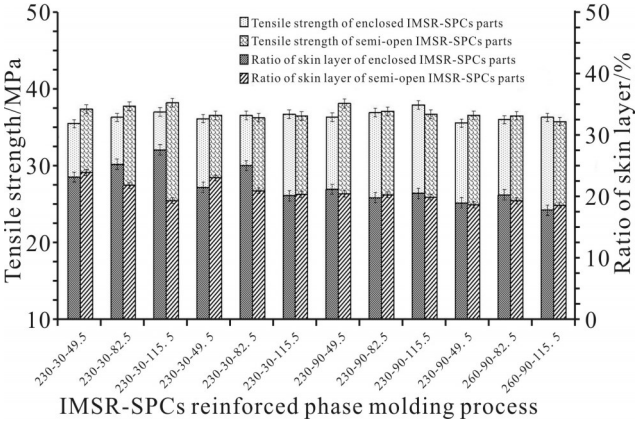


Fig. 7 Comparison data of skin layer area ratio and mechanical properties of IMSR- SRCs parts and conventional parts with different molding structures

忽略实验中的误差，从Fig.7的数据可以看出，不同成型参数的IMSR-SRCs制件的皮层面积占比高于常规制件，提升范围为24.45%~111.87%，半开式IMSR-SPCs制件皮层面积占比平均值略高于封闭式IMSR-SPCs制件（22.12%>21.74%）。这是因为半开式IMSR-SPCs制件增强熔体通道的一侧是金属模具（36>0.21），填充在金属槽中的熔体将损失更多热量，其黏度将增加，流动速度降低得更快，导致熔体温度快速下降到冰点以下，并使获得取向的分子由于快速冷却而得以保留，最终形成更厚的皮层结构。说明IMSR-SPCs制件的自增强效应与增强熔体填充基体流道后形成的形态特征密切相关。通过比较2种结构IMSR-SPCs制件的力学性能测试结果和皮层面积占比的变化，可以看出2种结构皮层面积占比的变化与力学性能规律相似。

2.3 晶体分子取向

为了评估常规制件与IMSR-SPCs制件在分子取向度上的不同，借助广角X射线衍射分析对于其各自的取向皮层和芯层的形态结构进行了定性的分析，得到的二维WAXD衍射图如Fig.8所示，其可以对晶体平面内的取向进行评估。

常规制件中呈现出完整的Debye环或近似各向同性的环的数量要多于封闭式IMSR-SRCs制件，如Fig.8(a)和Fig.8 (d)所示。对于常规制件而言，其剪切皮层的二维WAXD衍射图案呈现弧形，如Fig.8(b)所示；芯层的图案呈现完整的Debye环或近似各向同性的环，如Fig.8(c)所示。芯层全部呈现出完整的

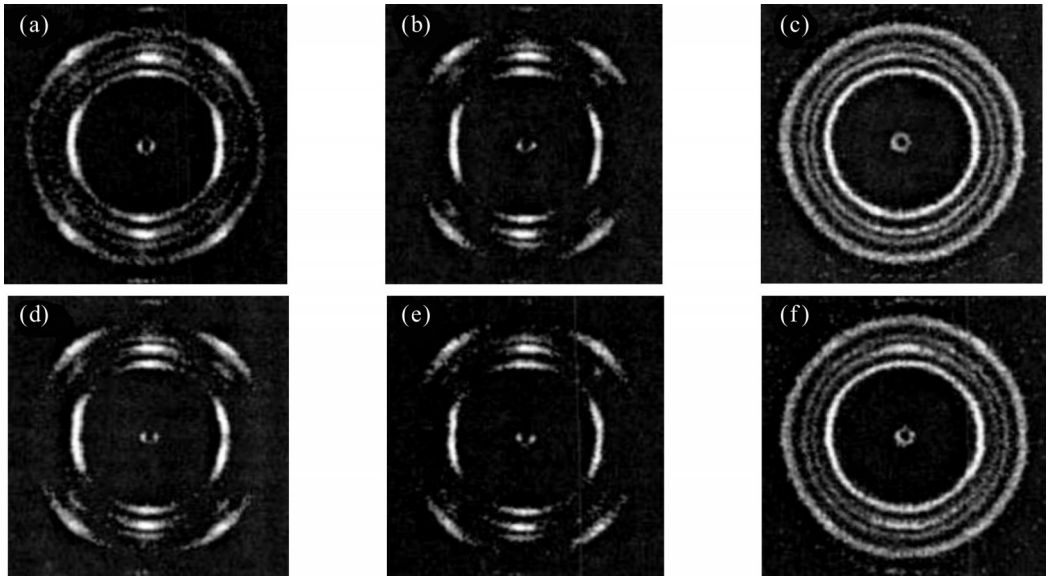


Fig. 8 Two-dimensional WAXD intensity diffraction pattern of two types of parts
(a): conventional integral parts; (b): skin layer of conventional parts; (c): core layer of conventional parts; (d): IMSR-SPCs integral parts; (e): skin layer of IMSR-SPCs; (f): core layer of IMSR-SPCs

Debye环或近似各向同性的环,说明芯层内分子取向性不明显。剪切层Debye环图案呈弧形,这表明在常规制件的剪切层有着明显的取向性,对比芯层可以看出,β(300)晶面明显存在于剪切层中。Fig.8(e)和Fig.8(f)显示了IMSR-SRCs制件的剪切层和核心层的衍射图案。可以看出,从内环到外环的组成与常规制件的组成相同。而且,大部分的Debye环都显示出较为显著的弧形,说明IMSR-SRCs制件具有更好的取向结构,大多数取向结构属于所谓的"shish-kebab"结构,表明2种制件的取向特性多数来自于皮层结构,表明采用共注射成型方法制备的IMSR-SPCs可以改善分子链的取向。

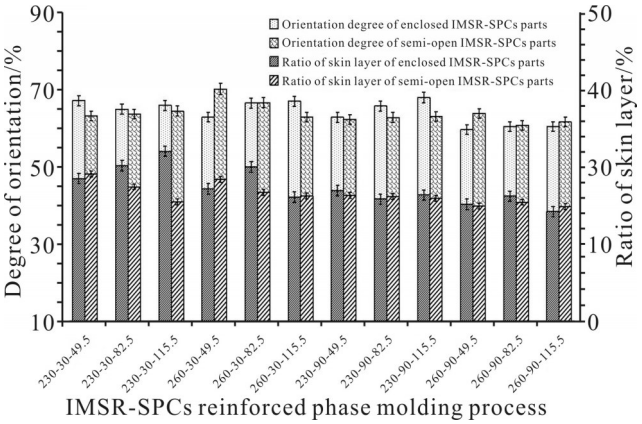


Fig. 9 Comparison data of the molecular orientation degree and skin layer area ratio of IMSR-SRCs parts and conventional parts with different molding structures

此外,如Fig.9所示,比较IMSR-SPCs制件的2种结构的取向度,结合皮层面积占比分析,得出以下结论:IMSR-SPCs制件的分子取向高于常规制件,改善幅度在3.94%～34.11%之间。而且,与相同参数的封闭式IMSR-SPCs相比,半开式IMSR-SPCs的分子取向可提高1.05%~19.48%。不同成型参数的IMSR-SPCs的分子取向度随增强体塑化温度和注射速度的升高而降低,随模具温度的变化规律不明显。这是因为增强体塑化温度的升高增加了流动性,熔体层之间的剪切应力减弱。此外,高温会导致冷却速度变慢,使部分取向分子解取向,分子取向度降低。提高注射速度将增加增强熔体的剪切阻力和摩擦阻力,增强黏性耗散效应,导致熔体的散热进一步降低,分子的取向不易保持,取向度降低。由于模具温度与塑化温度相差较大,且基体的存在起到隔热作用,模具温度对分子取向的影响不是很规律。进一步与表皮层面积占比数据比较表明,两者的总体变化规律相似,表明IMSR-SPCs制件的分子取向与表皮层面积占比呈正相关,这将有助于提高制件的力学性能。

2.4　多晶组成和结晶度

常规制件和IMSR-SPCs制件的一维WAXD强度分布曲线如Fig.10所示。2个样品的衍射峰位置相同。图中2θ=15.98°处的峰值表明2种样品中均存

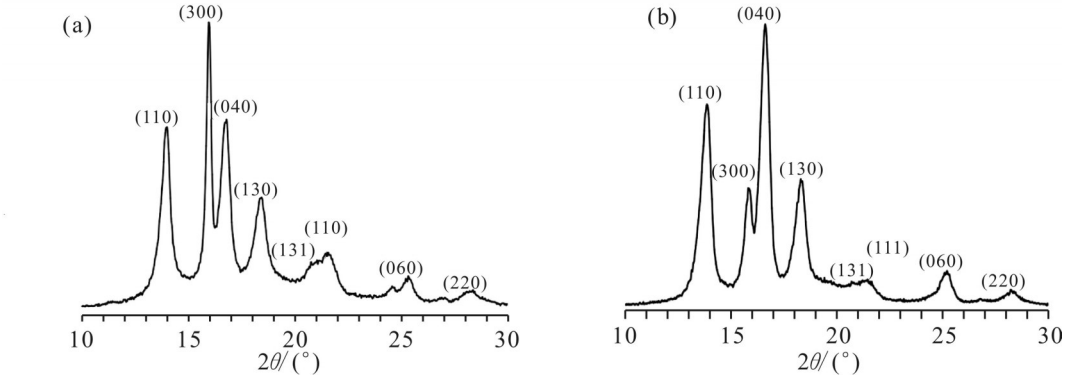


Fig. 10 One-dimensional WAXD intensity diffraction pattern
(a): conventional parts; (b): IMSR-SPCs parts

在β晶体。结合Fig.10(a)和Fig.10(b)可以发现，二次填充后形成的IMSR-SPCs在2θ=15.98°处的β（300）衍射峰强度由10144明显降低到3870，而α(040)晶面衍射峰强度大幅度增加，即从6898增加到9080。说明自增强复合填充方式的填充方式促进了α晶的生成，抑制了β晶的生长。

通过广角X射线衍射分析，可以得到IMSR-SPCS组分的一维WAXD强度分布，然后经过计算机校正后，对图像进行峰值处理，可以更准确地获得组分的结晶度值。对比分析了不同成型参数下的IMSR-SPCs制件及其对应的常规制件的结晶度值，以及相同成型参数下的半开式和封闭式IMSR-SPC制件的结晶度值，如Fig.11所示。

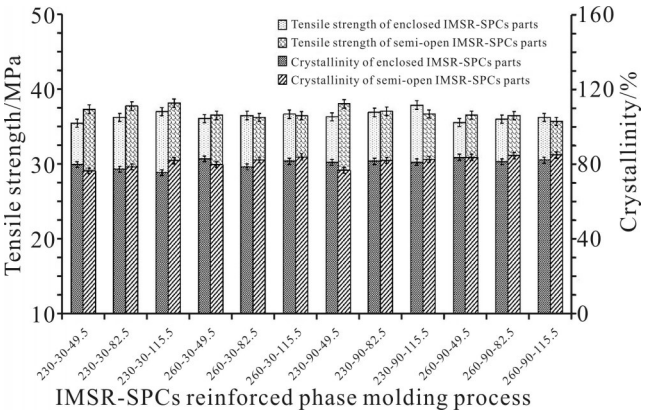


Fig. 11 Crystallinity and mechanical properties of IMSR-SRCs parts and conventional parts with different molding structures

从图中可以看出，结晶度对制件性能有抑制作用，不同成型参数的IMSR-SPCs制件的结晶度低于常规制件，降低幅度在4.35%~19.32%。结晶度随塑化温度的升高明显增加，但随模具温度的变化没有明显规律。在不同的模具温度和塑化温度下，注射速率的变化对IMSR-SPCs制件的结晶度有不同程度的影响。提高塑化温度使得增强熔体内部的大分子间具有足够的内聚能，有助于晶核的形成和生长；而提高模具温度会使基体保温效果更好，当增强熔体注射到型腔之后，冷却时间相比低温模具要长，使得大分子有足够的时间形成结晶结构，导致增强体内部也就有更大的结晶区域。大分子进行重新排列需要一定的热运动，在合适的条件下提高注射速度有助于大分子进行重新排列，也会提高熔体的剪切作用，并诱导形成晶核，使得获得取向的分子形成更多更加细密的晶体[13~15]，利于大分子进行结晶。通过比较封闭式和半开式IMSR-SPC，发现增强体填充结构的变化对制件的结晶度影响不大。然而，在低温场，封闭的IMSR-SPCs有利于结晶度的提高，而在高温场状态下，半开放结构的IMSR-SPCs的结晶度增加较快。

2.5 关系方程式

通过以上实验的对比分析可知，皮层面积占比、分子取向度和结晶度的变化都会影响IMSR-SRCs制件性能的变化。因此，采用响应面法定性和定量地评估了增强体多个成型变量之间的相互作用、成型变量对微观形态的影响以及微观形态与产品力学性能之间的关系。通过数据分析，找出显著影响因

Tab. 3 Mass coefficient of morphology on mechanical properties of enclosed and semi-open IMSR-SPCs parts

Parts	Factor	Skin layer area ratio	Molecular orientation	Crystallinity
Enclosed IMSR-SPCs	Mass coefficient/%	24.28	70.52	5.20
Semi-open IMSR-SPCs	Mass coefficient/%	9.56	84.43	6.00

素及各因素的影响系数，如Tab.3所示。可以看出，分子取向度是影响IMSR-SRCs性能的决定性因素。并借助最小二乘最小化程序，建立了成型参数、微观形态和力学性能之间的无量纲方程，如方程组(6)所示，初步实现了产品性能的“可调节性”。

$$\begin{cases} \lambda = -0.3502\varphi_s + 0.2524\gamma - 1.8762\Psi_s + 2.924 \\ \varphi_s = 2.4124 - 1.097\zeta_i - 0.0525\zeta_w - 0.0625\delta_v \\ \gamma = 1.5353 - 0.4661\zeta_i - 0.0109\zeta_w + 0.1202\delta_v \\ \Psi_s = -0.0129 + 1.979\zeta_i + 0.0564\zeta_w + 0.4548\delta_v \end{cases} \tag{6}$$

式中：λ——哑铃件拉伸强度的无量纲常数，$\lambda=\sigma_b/\sigma_n$，$\sigma_n$——对比件拉伸强度，其值为38.37 MPa；$\varphi_s$——制件整体皮层占比的无量纲常数，$\varphi_s=R_s/R_n$，$R_n$——常规制件的皮层占比，其值为14.88%；$\gamma$——分子取向度的无量纲常数，$\gamma=D_n/D$，$D$——常规制件的分子取向度，其值为55.16%；$\Psi_s$——整体制件结晶度的无量纲常数，$\Psi_s=\chi_s/\chi$，$\chi$——常规制件结晶度，其值为88.7%；$\zeta_i$——增强体塑化温度的无量纲常数，$\zeta_i=T_i/T_d$，$T_d$——材料分解温度，其值为350 ℃；$\zeta_w$——模具温度的无量纲常数，$\zeta_w=T_w/T_n$，$T_n$——室温下模具温度，其值为20 ℃；$\delta_v$——注射速度的无量纲常数，$\delta_v=v_i/v_m$，$v_m$——注塑机最高注射速度，其值为240 mm/s。

3　结论

（1）2种IMSR-SRCs制件的拉伸强度均优于常规制件，最大提高了14.42%，说明采用复合注射成型技术有助于IMSR-SRCs制件力学性能的提高。

（2）通过微观实验可知，IMSR-SRCs制件呈现双“皮-芯”结构，皮层面积占比与分子取向均高于常规制件，拉伸性能与皮层面积占比及分子取向呈正相关。结晶度均低于常规制件，其变化与拉伸性能呈负相关性。

（3）通过响应面分析得到分子取向度是影响IMSR-SRC性能的决定性因素，并借助最小二乘最小化程序，建立了成型参数、微观形貌和力学性能之间的无量纲方程，初步实现了基于成型参数对IMSR-SPCs制件力学性能的预测，为IMSR-SPCs制件性能的可调性提供理论支持。

参考文献：

[1] Fakirov S. Nano- and microfibrillar single-polymer composites: a review[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2013, 298: 9-32.

[2] Fakirov S. Polymer nanocomposites: why their mechanical performance does not justify the expectation and a possible solution to the problem?[J]. Express Polymer Letters, 2020, 14: 436-466.

[3] 王贯春, 李瑶, 李吉祥, 等. 导热绝缘高密度聚乙烯复合材料的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(5): 39-46.
Wang G C, Li Y, Li J X, *et al*. Preparation and properties of thermally conductive electrically insulative high density polyethylene-based composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(5): 39-46.

[4] 何跃龙,王建,何其超. 聚丙烯单聚合物复合材料的制备方法及应用研究现状[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(11):169-174.
He Y L, Wang J, He Q C. Preparation methods and application of polypropylene single-polymer composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(11): 169-174.

[5] Takazawa A, Kakiage M, Yamanobe T, *et al*. Effect of blending small amount of high- density polyethylene on molecular entanglements during melt- drawing of ultrahigh- molecular-weight polyethylene[J]. Polymer, 2022, 241: 124528.

[6] 张琰, 鲁勇, 姜开宇. 截面尺寸对PP共注射成型性能影响的仿真分析[J]. 模具工业, 2019, 45(5): 1-6.
Zhang Y, Lu Y, Jiang K Y. Simulation analysis for the influence of cross-section size on PP co-injection moulding characteristics[J]. Die and Mould Industry, 2019, 45(5): 1-6.

[7] Lu S F, Wang L X, Shen C Y. Investigation on the fiber orientation distributions and their influence on the mechanical property of the co-injection molding products[J]. Polymers, 2020, 12: 24.

[8] 姜开宇, 田净娜, 马家家, 等. 尺寸效应对多型腔注射成型过程影响的可视化实验[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(11): 122-125.

Jiang K Y, Tian J N, Ma J J, *et al*. Visualization experiment for the impact of scale effect on filling imbalance of injection molding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27 (11): 122-125.

[9] Whiteside B R, Martyn M T, Coates P D, *et al*. Processing-structure-properties of cork polymer composites[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 297.

[10] Giboz J, Copponnex T, Mélé P. Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review[J]. Frontiers in Materials, 2007, 17: R96-R109.

[11] Gülçür M, Brown E, Gough T, *et al*. Ultrasonic micromoulding: process characterisation using extensive in-line monitoring for micro-scaled products[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 289-301.

[12] Fujiyama M, Kitajima Y, Inata H. Rheological properties of polypropylenes with different molecular weight distribution characteristics[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 84: 2128-2141.

[13] Hou J, Zhang H G, Zhang N, *et al*. Characterization of manufacturability of microstructures for micro- injection moulding of micro devices using star patterns[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2020, 30: 025001.

[14] Kumaraswamy G. Crystallization of polymers from stressed melts [J]. Journal of Macromolecular Science-Polymer Reviews, 2005, C45: 375-397.

[15] Mutua A W, Balapour M, Farnam Y. Towards development of nature-inspired thermo-responsive vascular composites: analysis of polymeric composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259: 120407.

Influence of Composite Injection Molding on the Properties of Single Polymer Composite Parts with Different Molding Structures

Yong Lu, Chen Wang, Xinyong Liu

(*Intelligent Manufacturing Engineering Research Institute, Part Rolling Key Laboratory of Zhe Jiang Province, Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China*)

ABSTRACT: Self-reinforced polymer composites (IMSR-SRCs parts) with different structures were prepared by composite injection molding technology and their micro-morphology was observed. The results show that the tensile strength of semi-open IMSR-SRCs parts is increased by 16.89% on average compared with enclosed conventional parts, and the tensile properties of both are better than IMSR-SRCs parts, with a maximum increase of 14.42%. IMSR-SRCs parts show a double "skin-core" structure, and the area ratio of the skin layer is higher than that of conventional parts, and the semi-open type is 5.48% higher than the enclosed IMSR-SRCs parts. The tensile properties are positively related to the area ratio of the skin area. The 'shish-kebab' structure was observed by SEM on the skin layer structure of the PLM fusion position. WAXD results show that the crystallinity of the two kinds of IMSR-SRCs parts is not significantly different, and both are lower than the conventional parts, the maximum reduction is 19.23% , and the tensile properties are negatively correlated with the changes in crystallinity. The molecular orientation of the two structures is higher than that of the conventional parts, and the semi-open IMSR-SRCs has a higher orientation, with a maximum improvement of 34.11% . The molecular orientation is positively correlated with the tensile properties of IMSR-SRCs parts. By response surface method, the molecular orientation obtained is the decisive factor affecting the performance of IMSR-SRCs parts. Furthermore, by the least squares minimization program, the dimensionless equations among molding parameters, micro-morphologies and mechanical properties were established, and the prediction of mechanical properties of IMSR-SRCs parts based on microscopic morphology was realized.

Keywords: composite molding; self-reinforced; skin-core structure; performance prediction