

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.05.012

纤维增强注塑熔接线强度预测模型与实验研究

姜曙^{1,2}, 周俊², 王华欣², 翟孟雷², 黄明², 刘春太², 石程³

[1. 河南工程学院土木工程学院, 郑州 451191; 2. 郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 郑州 450002;

3. 易汇达(河南)新材料科技有限公司, 河南洛阳 471000]

摘要: 熔接线是影响注塑制品强度的关键因素之一,而目前以汇合角预测熔接线强度的力学模型并没有体现注塑工艺的影响。为了科学定量地认识熔接线区域强度的变化规律,准确预测熔接线力学性能,首先对带扇形孔的制品进行注塑模拟分析,研究了注塑温度、注射速率以及保压压力对熔接线汇合角的影响,结果显示注塑温度、保压压力不是通过改变熔体前沿汇合角来影响熔接线强度。基于此,为全面体现注塑工艺、汇合角对熔接线强度的影响,在现有模型基础上通过引入注塑工艺影响因子重新构造了体现注塑工艺、汇合角对熔接线区域强度影响的预测模型。设计并制造了用于成型扇形孔制品的注射模具,开展了不同工艺条件下 30% 长玻纤增强聚丙烯扇形孔制品注塑实验,根据实验结果推导出了体现注塑温度和保压压力影响的注塑工艺影响因子数学表达式,利用实验数据拟合确定了模型中的相关参数,并对模型进行了回归分析。结果表明,新构建的强度预测模型可以准确计算不同注塑温度、保压压力下熔接线不同位置的强度。

关键词: 熔接线; 汇合角; 熔接线强度; 纤维增强; 注塑成型

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)05-0081-07

Prediction model and experimental study of weld line strength in fiber reinforced injection molding

JIANG Shu^{1,2}, ZHOU Jun², WANG Huaxin², ZHAI Menglei², HUANG Ming², LIU Chuntao², SHI Cheng³

[1. College of Civil Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

2. National Engineering Research Center for Advanced Polymer Processing Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

3. Yihuida (Henan) New Materials Technology Co., Ltd., Luoyang 471000, China]

Abstract : The weld line is a crucial factor influencing the strength of injection molding products. However, the current mechanical model that predicts weld line strength based on converging angle fails to consider the impact of the injection molding process. In order to scientifically and quantitatively understand the variation law of the regional strength of the fuse connection and accurately predict the mechanical properties of the fuse connection, injection molding simulation analysis on the products with fan-shaped holes was firstly carried out, and the effects of injection molding temperature, injection rate and holding pressure on the converging angle of fusion line were studied. The results show that the injection molding temperature and holding pressure do not affect fusion line strength by changing the melt front converging angle. Based on this, in order to comprehensively reflect the influence of injection molding process and converging angle on weld line strength, the prediction model reflecting the influence of injection molding process and converging angle on weld line strength was reconstructed by introducing injection molding process influence factor. By designing and manufacturing an injection mold for molding fan-hole products, injection molding experiments of 30wt% long glass-fiber reinforced polypropylene fan-shaped hole products under different technological conditions were carried out. Based on the experimental results, the mathematical expression of the injection molding process influence factor reflecting the effects of injection temperature and holding pressure was derived, the relevant parameters in the model through data fitting were determined. The regression analysis of weld line strength prediction model shows that the strength model established can accurately predict the tensile strength of weld line at different positions under different injection molding conditions.

Keywords : weld line ; converging angle ; weld line strength ; fiber reinforced ; injection molding

基金项目: 河南省重大科技专项(221100240400), 深圳市科技计划项目(CJGJZD20210408092602006)

通信作者: 黄明, 教授, 博士, 主要研究方向为高分子及其复合材料成型与模拟

收稿日期: 2024-01-04

引用格式: 姜曙, 周俊, 王华欣, 等. 纤维增强注塑熔接线强度预测模型与实验研究[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(5): 81-87.

JIANG Shu, ZHOU Jun, WANG Huaxin, et al. Prediction model and experimental study of weld line strength in fiber reinforced injection molding[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5): 81-87.

注塑是纤维增强复合材料的主要成型方式之一^[1-2],能高效率成型形状复杂、带有嵌件的塑料制件,且产品质量稳定。当制品壁厚变化较大、模腔中存在孔洞或嵌件、采用多浇口注塑时,熔体会向多个方向流动,在两股熔体交汇处形成熔接线^[3]。熔接线不仅影响制品外观,而且微观结构松散,易造成应力集中,从而使该部分强度降低,易发生断裂^[4-6]。通常认为当两股熔体的汇合角 Φ 小于 135° 时形成熔接线,如图1所示,此时对制品强度影响较大。当 Φ 大于 135° 时形成熔合纹,对强度影响较小^[7]。注塑制品熔接线区域力学性能差是一种共识^[8-9],研究发现影响熔接线力学性能的因素主要有熔接线结构^[10]、材料性能^[11]、注塑工艺参数^[12-13]等。

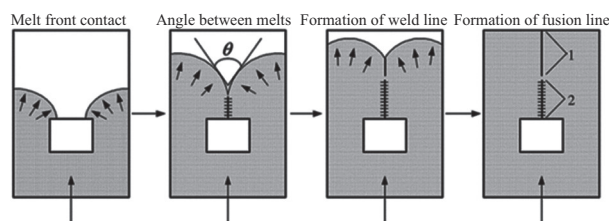


图1 熔接线和熔合纹

Fig. 1 Weld lines and fusion lines

近些年随着复合材料的发展,注塑工艺逐渐被用来成型大尺寸、高强度、高刚度要求的主承力/次承力结构件,熔接线这一传统注塑缺陷在大尺寸制品上被放大,熔接线强度的预测成为研究热点^[14-16]。Zhou等^[17]建立了基于人工神经网络的熔接线性能评价模型,讨论了影响熔接线力学性能的因素,指出汇合角越大熔接线性能越好。Hopmann等^[18]研究了嵌件形状对聚碳酸酯熔接线强度的影响,结果表明熔接线强度对嵌件几何形状和到嵌件的距离有很强的依赖性,并指出熔接线强度与汇合角不是简单的线性关系,而是呈某种指数关系。Gao等^[19]在研究中指出汇合角越大熔接线强度越大,并构建了以汇合角预测熔接线强度的力学模型,但该模型存在对工艺参数不敏感的缺陷。

大量研究表明,熔接线性能与汇合角息息相关,汇合角越大熔接线强度越高,然而目前以汇合角预测熔接线强度的力学模型并没有体现注塑工艺的影响,这极大地影响了设计阶段对产品结构行为、服役行为模拟预测的准确性。

针对上述问题,首先开展带扇形孔制品的注塑模拟分析,研究注塑温度、注射速率以及保压压力对熔接线汇合角的影响,全面评估注塑工艺、汇合

角对熔接线强度的影响。根据模拟分析结果,通过引入注塑工艺影响因子重新构造体现注塑工艺、汇合角对熔接线区域强度影响的预测模型。然后,设计、制造扇形孔制品注射成型模具,开展不同工艺条件下纤维增强聚丙烯(PP)注塑制品熔接线区域强度变化规律的实验研究。基于实验结果,构建注塑工艺影响因子的数学表达式,并确定预测模型的相关参数。最后,对预测模型进行回归分析,通过与实验对比验证其可靠性。

1 熔接线强度预测模型

Gao等^[19]通过研究,给出了熔接线强度随汇合角变化的预测模型,即:

$$\sigma_\Phi = \sigma_b + (\sigma_\omega - \sigma_b) e^{c_0 \left(\frac{\Phi}{\Phi - 180} \right)} \quad (1)$$

式中, σ_b 为无熔接线区域制品拉伸强度; σ_Φ 和 σ_ω 分别为汇合角为 Φ 和 0° 时拉伸强度; c_0 为常数。该模型仅考虑了汇合角对熔接线强度的影响,并未体现注塑工艺的影响。然而大量实验表明,纤维增强注塑制品熔接线区域的力学性能受注塑工艺影响也较大^[12-13],因此该模型有一定局限性。为评估公式(1)给出的预测模型局限性,针对图2a所示的带扇形孔模型,开展注塑温度、注射速率以及保压压力等工艺参数对熔接线汇合角的影响模拟研究。

采用中面模型开展模流分析,共划分出9 137个网格,如图2b所示,注塑材料为30%长玻纤增强PP(PP/LGF, Sabic 30YM240),工艺参数设置见表1,保压时间8 s,冷却时间12 s。

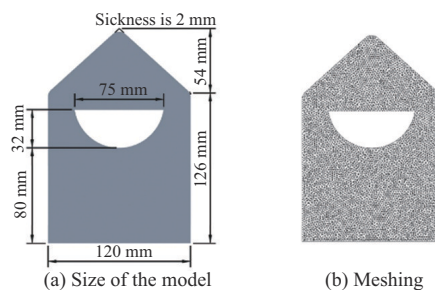


图2 带扇形孔分析模型

Fig. 2 Analytical model with sectorized hole

以表1中工艺方案1为标准注塑条件,图3为工艺方案1模拟得到熔接线分布。为方便说明不同位置熔接线汇合角变化,对熔接线上的各个节点进行编号,如图3b所示。在表1的工艺条件下,图4分别给出了各节点汇合角随熔体温度 T 、注射速率 V 和保压压力 P 改变的变化趋势。图中结果表明,在两股熔体首次相遇的位置(即节点2和3),汇合角最

表1 注塑成型工艺参数

Tab. 1 Parameters of injection molding process

Process solutions	Injection temperature/°C	Injection rate/(cm ³ ·s ⁻¹)	Holding pressure/MPa
1	240	50	25
2	220	50	25
3	260	50	25
4	240	50	15
5	240	50	35
6	240	35	25
7	240	65	25

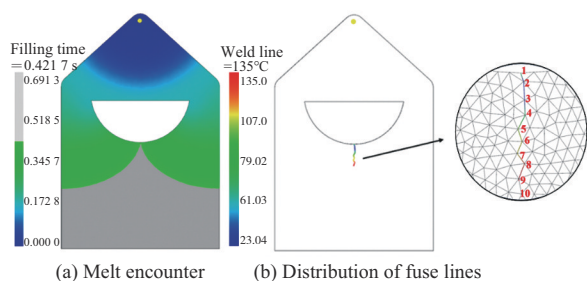


图3 熔接线模拟结果

Fig. 3 Simulation results of weld line

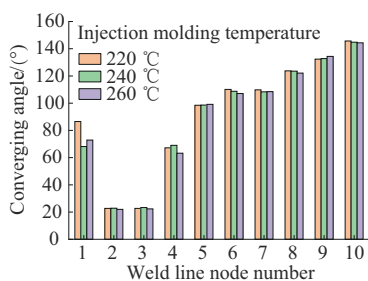
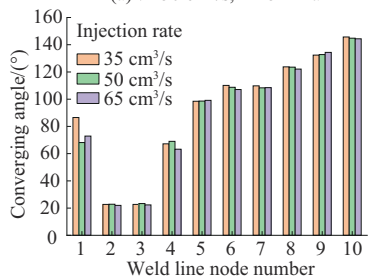
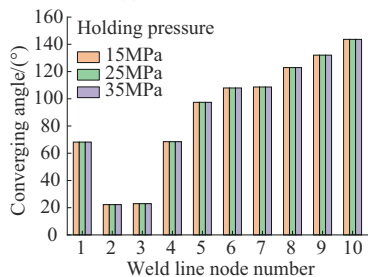
(a) $V=50 \text{ cm}^3/\text{s}$, $P=25 \text{ MPa}$ (b) $T=240 \text{ °C}$, $P=25 \text{ MPa}$ (c) $T=240 \text{ °C}$, $V=50 \text{ cm}^3/\text{s}$

图4 不同注塑工艺下熔接线汇合角度变化

Fig. 4 Changes in the convergence angle of weld line under different injection molding

小,首次相遇后形成的熔接线汇合角逐渐增大。当改变熔体温度时,整个熔接线上汇合角仅有微小差别,如图4a所示,表明从模拟的角度看熔接线汇合角对熔体温度的改变并不敏感。同样,保压压力改变时汇合角几乎没有变化,如图4c所示。只有在注射速率改变时,汇合角才有些许变化,如图4b所示。

上述结果表明,从模拟角度分析熔体温度、保压压力对熔接线汇合角的影响非常有限,这就意味着如果采用仅含有汇合角参数的公式(1)计算熔接线强度,不能体现工艺参数对熔接线强度的影响,因此式(1)存在对工艺参数不敏感的缺陷。基于此,重新构造了熔接线区域强度预测模型,见公式(2):

$$\begin{cases} \sigma_{\Phi} = \sigma_b + (\sigma_w - \sigma_b) \times t \times e^{\frac{c_0}{\Phi - 180}} \\ t = f(T, P) \\ \Phi < 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 t 为与熔体温度和保压压力有关的注塑工艺影响因子,该式表达了拉伸强度和汇合角以及注塑工艺之间的关系。 t 的数学表达式和模型中的相关参数将通过实验数据拟合得到。

2 熔接线注塑实验与模型参数确定

2.1 实验研究

针对图2所示带扇形孔模型,设计制造了用于成型该制品的注射模具,如图5a所示。将30% LGF填充PP置于100 °C的干燥箱进行干燥处理4 h后,注塑成型了一批具有熔接线的复合材料样板,注塑工艺与模拟分析一致。在样板不同位置分别切割

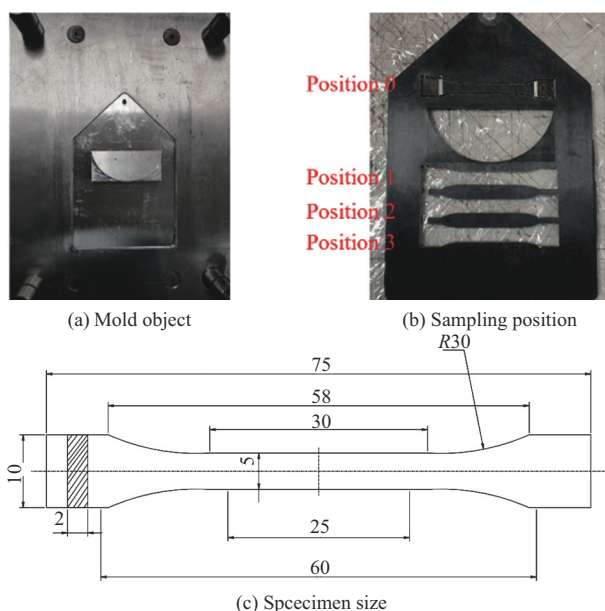


图5 熔接线实验模具及制品

Fig. 5 Experimental mold and products for weld line

熔接线拉伸试样和无熔接线拉伸试样,如图5b和图5c所示。按照ISO 527-1-2019进行拉伸测试,相同位置测试5组。不同注塑温度下试样拉伸强度见表2。由表2可发现在同一注塑温度下,无熔接线试样(位置0)拉伸强度最大,而对于带熔接线试样,随着远离扇形孔其强度呈小幅增加趋势,表明熔体前沿汇合角越大,熔接线强度越大。在注塑温度分别为220,240℃时,相同位置拉伸强度基本保持一致,而当注塑温度升至260℃时,相同位置拉伸强度较220℃和240℃有所下降,可能的原因是260℃的注塑温度偏高,部分PP高分子链发生了降解。

表2 不同注塑温度下试样平均拉伸强度

Tab. 2 Average tensile strength of specimens at different injection temperatures

Positions	MPa		
	Tensile strength at 220 °C	Tensile strength at 240 °C	Tensile strength at 260 °C
0	110.634	108.878	101.078
1	33.502	33.089	29.795
2	34.359	34.306	30.873
3	35.136	35.106	31.603

不同保压压力下试样拉伸强度见表3。由表3可发现,在同一保压压力下,无熔接线试样(位置0)拉伸强度最大,而对于带熔接线试样,距离扇形孔越远,熔接线试样拉伸强度越大。对于同一位置试样,随着保压压力的增大,其拉伸强度均呈增大趋势,表明保压压力对拉伸强度有较大影响,这是由于随着保压压力的增大,熔体被压实程度增加,塑料密度增加,进而影响了制品的强度。

表3 不同保压压力下试样平均拉伸强度

Tab. 3 Average tensile strength of specimens under different holding pressures

Positions	MPa		
	Tensile strength at 15 MPa	Tensile strength at 25 MPa	Tensile strength at 35 MPa
0	104.259	108.878	112.664
1	31.264	33.089	34.452
2	32.625	34.306	35.389
3	33.734	35.106	36.406

上述实验结果表明:在相同工艺条件下,熔接线试样距离扇形孔越远,其拉伸强度小幅度增大,即试样强度随着汇合角的增大而增大;对于相同位置熔接线试样,随着注塑工艺的改变其拉伸强度也改变,即注塑工艺也是影响强度的重要因素,该实验结果为构建注塑工艺影响因子 t 的数学表达式提供了数据支撑。

2.2 注塑工艺影响因子 t 的数学表达式

将基于表2和表3的实验数据构建注塑工艺影响因子 t 的数学表达式,以及确定公式(2)的参数。

(1) 强度预测模型参数拟合。

首先,通过模拟得到不同工艺条件下熔接线位置1至3的汇合角,见表4;然后,设定工艺方案1为标准工艺参数,并定义在标准工艺下 $t=1$;最后,采用标准工艺下不同熔接线位置汇合角度和拉伸强度数据对式(2)进行拟合,如图6所示,得到 $\sigma_b=108.878$ MPa, $\sigma_w=32.531$ MPa, $c_0=0.00647$ 。因此,在工艺方案1的条件下,熔接线强度预测模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\Phi} = \sigma_b + (\sigma_w - \sigma_b) \times t \times e^{c_0(\frac{\Phi}{180})} \\ \sigma_b = 108.878, \sigma_w = 32.531, c_0 = 0.00647 \\ t = 1 \\ \Phi < 180^\circ \end{array} \right. \quad (3)$$

表4 不同工艺条件下不同位置熔接线平均汇合角

Tab. 4 Average angle of convergence of weld line at different positions under different process conditions

Positions	Process				
	option 1	option 2	option 3	option 4	option 5
1	90.174	91.773	89.083	90.174	90.174
2	145.792	144.252	143.747	145.792	145.792
3	152	150	148	152	152

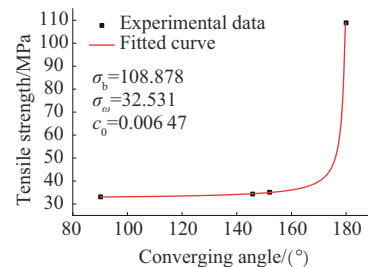


图6 标准工艺下拉伸强度拟合

Fig. 6 Tensile strength fitting in standard process

(2) t 数学表达式构建。

在公式(3)中 $t=1$,因此它仅适用于工艺方案1下任意熔接线位置强度预测。要体现熔体温度和保压压力对熔接线强度的影响,首先假设在其他工艺条件下 σ_b, σ_w 和 c_0 与标准工艺条件下一致,并将 t 构造为熔体温度和保压压力的函数,见式(2)所示,即通过 t 的变化来体现注塑工艺对强度的影响。

为构建式(2)中 t 的具体表达式,需要研究保压压力、熔体温度对 t 的影响规律,这里定义两个相对参数:①相对保压压力: P_i/P_0 , P_0 为最大注射压力, P_i 为保压压力;②相对注塑温度: T_k/T_0 , T_0 为该高聚物

推荐熔体温度(注塑温度), T_k 为实际注塑温度。针对 30% LGF 填充 PP 的注塑实验和模拟, 工艺方案 1 下模流分析得到的最大注射压力 $P_0=26.31$ MPa, 推荐注塑温度 $T_0=230$ °C。

为研究保压压力对熔接线强度影响规律, 引入相对保压压力影响因子 r_p , 其表达式为:

$$r_p = \frac{\sigma^0 - \sigma_{P_i}^j}{\sigma^0 - \sigma^j} \quad (4)$$

式中: σ^0 和 σ^j 分别为标准工艺条件下无熔接线试样强度和位置 j 处熔接线试样强度; $\sigma_{P_i}^j$ 为保压压力为 P_i 时位置 j 处熔接线试样强度。 r_p 表示相较于工艺方案 1, 试样强度受保压压力影响的程度。不同保压压力下、不同位置 r_p 的计算结果见表 5。由表 5 可知, 在同一位置, r_p 随相对保压压力的增大而减小, 且在相对保压压力为 0.950 (工艺方案 1) 时 $r_p=1$, 即在标准工艺条件下 $r_p=1$ 。

表 5 不同相对保压压力下不同位置 r_p 数据

Relative holding pressures	r_p at position 1	r_p at position 2	r_p at position 3
0.570 (15 MPa/26.31 MPa)	1.024	1.023	1.019
0.950 (25 MPa/26.31 MPa)	1	1	1
1.330 (35 MPa/26.31 MPa)	0.982	0.985	0.982

同理, 引入了相对注塑温度的影响因子 r_T , 其表达式为:

$$r_T = \frac{\sigma^0 - \sigma_{T_k}^j}{\sigma^0 - \sigma^j} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{T_k}^j$ 为注塑温度为 T_k 时位置 j 处熔接线试样强度; r_T 表示相较于工艺方案 1, 试样强度受注塑温度影响的程度。不同注塑温度下、不同位置 r_T 的计算结果见表 6。由表 6 可知, 在同一位置, r_T 随相对注塑温度的升高而增大, 且在相对注塑温度为

表 6 不同相对注塑温度下不同位置 r_T 数据

Relative injection temperature	r_T at position 1	r_T at position 2	r_T at position 3
0.957 (220 °C/230 °C)	0.995	0.993	0.998
1.043 (240 °C/230 °C)	1	1	1
1.130 (260 °C/230 °C)	1.043	1.046	1.047

1.043 (工艺方案 1) 时 $r_T=1$ 。

对式(2)分析可知 $(\sigma_\omega - \sigma_b) \times t$ 小于 0, 因此在汇合角 Φ 相同时, t 越小, 拉伸强度 σ_ϕ 越大。由表 3 可知, 相同位置(汇合角相同)的熔接线强度随着保压压力的增大而增大, 那么 t 则需随着保压压力的增大而减小以满足保压压力增大强度亦增大的趋势, 即: 相对保压压力与 t 成反比关系, 同时由表 5 可知, 相对保压压力与 r_p 也呈反比例关系, 所以 t 与 r_p 呈正比例关系。由表 2 可知, 相同位置的熔接线强度随着注塑温度的升高而降低, 那么 t 则需随着注塑温度的增大而增大, 即: 相对注塑温度与 t 呈正比例关系, 同时由表 6 可知, 相对注塑温度与 r_T 也呈正比例关系, 所以 t 与 r_T 呈正比例关系。因此, t 与 r_p, r_T 均成正比例关系, 那么 t 可定义为:

$$t = r_p \times r_T \quad (6)$$

根据表 5 中数据, 对相对保压压力和相对保压压力的影响因子 r_p 进行线性拟合, 如图 7a 所示, 得到二者的关系式为:

$$r_p = -0.0506 \times \frac{P_i}{P_0} + 1.0497 \quad (7)$$

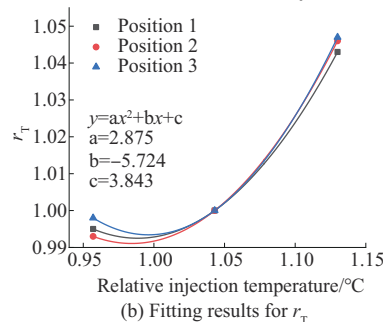
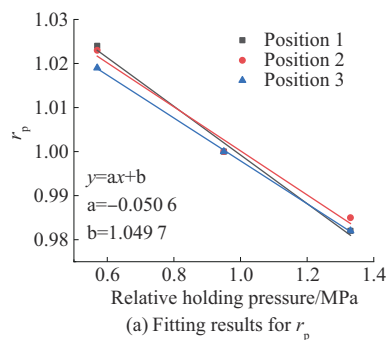


图 7 r_p 和 r_T 拟合结果

Fig. 7 Results of the fitting of r_p and r_T

同理, 对 r_T 和相对注塑温度进行二次拟合, 如图 7b 所示, 得到二者的关系式为:

$$r_T = 2.875 \times \left(\frac{T_k}{T_0}\right)^2 - 5.724 \times \frac{T_k}{T_0} + 3.843 \quad (8)$$

结合公式(2)以及式(6~8), 可得到任意合理汇合

角和工艺参数下熔接线强度计算公式:

$$\begin{cases} \sigma_{\Phi} = \sigma_b + (\sigma_{\omega} - \sigma_b) \times t \times e^{\frac{c_0}{\Phi - 180}} \\ \sigma_b = 108.878, \sigma_{\omega} = 32.531, c_0 = 0.00647 \\ t = r_p \times r_T \\ r_p = -0.0506 \times \frac{P_i}{P_0} + 1.0497 \\ r_T = 2.875 \times \left(\frac{T_k}{T_0}\right)^2 - 5.724 \times \frac{T_k}{T_0} + 3.843 \\ \Phi < 180^\circ \end{cases} \quad (9)$$

至此,构建了体现汇合角和注塑工艺影响的熔接线强度预测模型,从理论上讲,该模型可计算出任意合理注塑温度和保压压力下任意熔接线区域的拉伸强度。需要指出的是,式(9)的参数 $\sigma_b, \sigma_{\omega}, c_0$ 是针对30%长玻纤增强PP(Sabic 30YM240)的实验结果拟合得到的,针对其他材料需要根据实验结果重新拟合。

3 回归分析

为验证熔接线强度预测模型的可靠性,对其进行回归分析,即:在相同的工艺条件下,将模型预测的熔接线强度与实验结果进行对比。

当 $T_k=240^\circ\text{C}, P_i=15\text{ MPa}$ 时,由式(9)可得:

$$\begin{cases} \sigma_{\Phi} = 108.878 - 77.989e^{0.00647 \frac{\Phi}{\Phi - 180}} \\ \Phi < 180^\circ \end{cases} \quad (10)$$

公式(10)可用于预测该工艺条件下任意熔接线区域的拉伸强度,预测结果与实验结果对比如图8a所示,可发现二者吻合度较好,表明式(10)能准确预测该工艺条件下熔接线区域不同位置的强度。同理,当 $T_k=240^\circ\text{C}, P_i=35\text{ MPa}$ 时,预测结果与实验结果对比如图8b所示,二者吻合度仍较好。该对比分析表明,构建的熔接线强度计算模型能准确地预测不同保压压力下熔接线区域拉伸强度。

同理,当 $T_k=220^\circ\text{C}, P_i=25\text{ MPa}$ 和 $T_k=260^\circ\text{C}, P_i=25\text{ MPa}$ 时,模型预测的强度与实验对比分别见图9a和图9b所示,预测强度曲线与实验值均吻合较好,表明构建的模型能准确预测不同注塑温度下熔接线区域的试样强度。

综上所述,根据构建的强度预测模型可准确计算出在合理注塑温度以及保压压力下熔接线区域不同位置的拉伸强度。

4 结论

熔接线是影响注塑制品强度的关键因素之一,

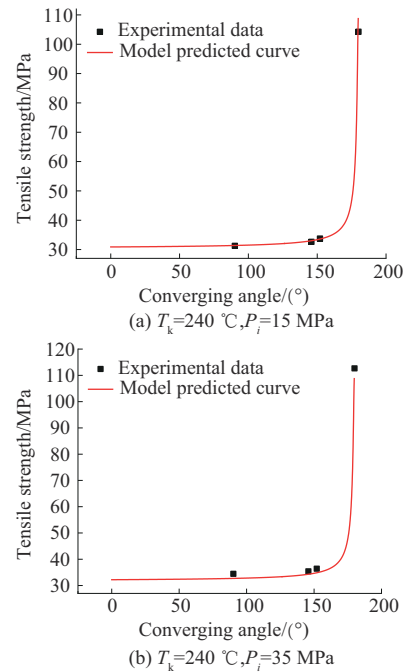


图8 不同保压压力下熔接线预测强度与实验对比

Fig. 8 Comparison of predicted and experimental strength of weld line at different holding pressures

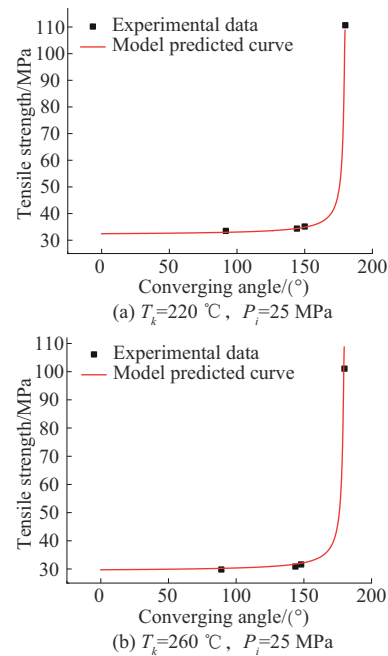


图9 不同注塑温度下熔接线预测强度与实验对比

Fig. 9 Comparison of predicted strength of weld line at different injection temperatures

而现有以汇合角预测熔接线强度的力学模型未体现注塑工艺对强度的影响。针对该问题,构建了体现注塑工艺、汇合角对熔接线强度影响的力学模型,主要结论如下:

(1) 针对带扇形孔制品,开展了注塑温度、注射

速率以及保压压力对熔接线汇合角影响的模拟研究,结果显示注塑温度、保压压力不是通过改变汇合角来影响熔接线强度。基于此,为全面体现注塑工艺、汇合角对熔接线强度的影响,在现有模型基础上通过引入注塑工艺影响因子重新构造了熔接线区域强度预测模型。

(2) 设计并制造了用于成型扇形孔制品的注射模具,开展了不同工艺条件下纤维增强PP扇形孔注塑板熔接线区域强度变化规律的实验研究。基于实验结果,推导出体现注塑温度和保压压力影响的注塑工艺影响因子数学表达式,通过实验数据拟合确定了熔接线强度预测模型的相关参数。

(3) 针对熔接线强度预测模型的回归分析显示,构建的强度模型能较准确地预测不同注塑条件下熔接线不同位置的拉伸强度。

参考文献

- [1] WERNER V, KRUMPHOLZ R, REHEKAMPFF C, et al. Thermoplastic encapsulations of a sensor platform by high-temperature injection molding up to 360 °C [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2019, 59(7):1 315–1 331.
- [2] 戴志鹏, 陈鑫, 柳益善, 等. 塑注件成型缺陷的分析与处理[J]. *现代工业经济和信息化*, 2022, 12(7):259–260.
DAI Zhipeng, CHEN Xin, LIU Yishan, et al. Analysis and treatment of molding defects in plastic injection parts[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2022, 12(7):259–260.
- [3] 李海梅, 高峰, 申长雨. 注塑制品常见的缺陷及对策[J]. *工程塑料应用*, 2003, 31(4):48–51.
LI Haimei, GAO Feng, SHEN Changyu. Common defects of the injection molded parts and the countermeasures[J]. *Engineering Plastics Application*, 2003, 31(4):48–51.
- [4] ONKEN J, VERWAAYEN S, HOPMANN C. Evaluation of healing models to predict the weld line strength of the amorphous thermoplastic polystyrene by injection molding simulation[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2021, 61(3):754–766.
- [5] TOMARI K, TONOGAI S, HARADA T, et al. The V-notch at weld lines in polystyrene injection moldings[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1990, 30(15):931–936.
- [6] FELLAHI S, MEDDAD A, FISA B, et al. Weldlines in injection-molded parts: A review[J]. *Advances in Polymer Technology*, 1995, 14(3):169–195.
- [7] NGUYEN C T. Flow analysis of the weld line formation during injection mold filling of thermoplastics[J]. *Rheologica Acta*, 2004, 43(3):240–245.
- [8] LI S, ZHAO G, WANG J. A method to improve dimensional accuracy and mechanical properties of injection molded polypropylene parts[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2017, 37(4):323–334.
- [9] ZHAO Y, MATTNER T, DRUMMER D. Investigation of the effects of pre-cross-linked thermoset molding compounds on weld line strength in injection molding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105:1 723–1 733.
- [10] YAMADA K, TOMARI K, ISHIAKU U S, et al. Fracture toughness evaluation of adjacent flow weld line in polystyrene by the SENB method[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2005, 45(8):1 059–1 066.
- [11] 马清水. 常用工程塑料熔接线强度的研究与应用[J]. *厦门科技*, 2020(6):51–60.
MA Qingshui. Research and application of the strength of commonly used engineering plastics for welding lines[J]. *Xiamen Science & Technology*, 2020(6):51–60.
- [12] 何建林, 白志鹏. 基于Moldflow的汽车配件CAE优化分析[J]. *机械设计与制造工程*, 2019, 48(2):16–20.
HE Jianlin, BAI Zhipeng. CAE optimization analysis on the automotive parts based on Moldflow[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2019, 48(2):16–20.
- [13] NASIR S M, SHAYFULL Z, SHARIF S, et al. Evaluation of shrinkage and weld line strength of thick flat part in injection moulding process[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43(10). DOI:10.1007/s40430-021-03060-y.
- [14] LIU Q, LIU Y, JIANG C, et al. Modeling and simulation of weld line location and properties during injection molding based on viscoelastic constitutive equation[J]. *Rheologica Acta*, 2020, 59(2):109–121.
- [15] DORF T, FERRER I, CIURANA J. The effect of weld line on tensile strength of polyphenylsulfone (PPSU) in ultrasonic micro-moulding technology[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103:2 391–2 400.
- [16] QUINTANA M C, FRONTINI P. Weld line strength factors in a reinforced injection molded part: Relationship with predicted fiber orientation[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2020, 39(5-6):219–230.
- [17] ZHOU H, LI D. Modelling and prediction of weld line location and properties based on injection moulding simulation[J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2004, 21(6):526–538.
- [18] HOPMANN C, ONKEN J. Prediction of part geometry-dependent weld line strength in unreinforced polycarbonate[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2018, 37(7):2 579–2 587.
- [19] GAO R, CHEN H, HU Z, et al. An integrated simulation method for analyzing mechanical properties of injection molded fiber-reinforced polymers[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(7):4 530–4 543.