

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.014

基于工艺-结构耦合的某型含短玻纤进出水口接头的失效行为验证

于涛涛^{1,2}, 黄崇洋², 郭喜锋², 徐正杰², 陈振中¹

(1. 东华大学机械工程学院, 上海 201620; 2. 上海亚大汽车塑料制品有限公司, 上海 201708)

摘要: 针对短玻璃纤维(SGF)增强复合材料注塑件在传统结构分析满足强度要求条件下仍出现早期断裂失效的问题,以某型尼龙66(PA66)/GF25(GF含量为25%)进出水口接头为研究对象,建立基于Moldflow、Digimat与Ansys的工艺-结构耦合分析模型,对SGF增强注塑件的失效行为进行研究。利用Moldflow对注塑充填过程进行模拟,获得纤维取向分布及熔接线位置;通过Digimat完成纤维取向张量和熔接线的映射,并在Ansys中建立考虑各向异性与熔接线强度折减的结构模型;采用Tsai-Hill失效准则对结构断裂失效进行预测,并通过工装加载试验对仿真结果进行验证。仿真结果显示,采用双浇口方案时在接头中部形成明显熔接线区域,熔接线附近纤维取向连续性较差,局部应力集中明显。传统各向同性结构分析预测结构极限载荷为2 352.1 N,而考虑纤维取向及熔接线影响后的工艺-结构耦合分析预测失效载荷为1 184.1 N,与工装试验结果1 079.0 N较为接近,误差约为9.7%,且失效区域均位于熔接线附近。将浇注系统由双浇口调整为单浇口后,熔接线位置发生偏移,纤维主取向与载荷方向一致性提高,分析预测出结构极限承载能力提升至2 320.9 N,与工装试验结果2 427.1 N误差仅为4.4%。结果表明,该接头注塑件的单浇口方案能有效提高结构的整体承载能力,并且纤维取向及熔接线对SGF增强注塑件局部强度具有显著影响,而考虑纤维取向及熔接线强度折减的工艺-结构耦合分析能够较准确地反映SGF增强注塑件的实际失效位置及承载能力。

关键词: 工艺-结构耦合分析;短玻纤增强复合材料;断裂失效;熔接线;纤维取向

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0125-08

Verification of failure behavior of a specific type of inlet and outlet fittings containing short glass fibers by process-structure coupling

YU Taotao^{1,2}, HUANG Chongyang², GUO Xifeng², XU Zhengjie², CHEN Chenzhong¹

(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Chinaust Automotive Plastics Co., Ltd., Shanghai 201708, China)

Abstract: To address the issue that short glass fiber (SGF) reinforced composite injection molded parts still exhibit early failure even when the traditional structural analysis meets the strength requirements, a specific type of PA66 GF25 inlet and outlet connector was focused on, and a process-structure coupled analysis model based on Moldflow, Digimat and Ansys was established to investigate the failure behavior of injection-molded parts with SGF reinforced material. Moldflow was used to simulate the injection molding filling process to obtain the fiber orientation distribution and the location of the weld line. Digimat was used to map the fiber orientation tensor and the weld line, and a structural model accounting for anisotropy and strength reduction at the weld line was established in Ansys. Tsai-Hill failure criterion was adopted to predict structural fracture failure, and the simulation results were validated through tooling loading tests. The simulation results show that when using dual-gate configuration, a distinct weld line region forms in the center of the joint, where the continuity of fiber orientation near the weld line is poor and local stress

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375236), 东华大学2025年度学科创新领域培育项目(xkcx-202513)

通信作者: 陈振中, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料结构轻量化设计、可靠性设计、优化建模、无损检测等

收稿日期: 2026-05-20

引用格式: 于涛涛, 黄崇洋, 郭喜锋, 等. 基于工艺-结构耦合的某型含短玻纤进出水口接头的失效行为验证[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 125-132.

YU Taotao, HUANG Chongyang, GUO Xifeng, et al. Verification of failure behavior of a specific type of inlet and outlet fittings containing short glass fibers by process-structure coupling[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 125-132.

concentration is significant. Traditional isotropic structural analysis predicted a structural ultimate load of 2 352.1 N, whereas the process-structure coupled analysis which accounted for fiber orientation and the influence of the weld line predicted a failure load of 1 184.1 N. This value is relatively close to the jig test result of 1 079.0 N, with an error of approximately 9.7%. Furthermore, the failure regions are all located near the weld line. After adjusting the gate system from a dual-gate configuration to a single-gate configuration, the position of the weld line shifted, and the alignment of the primary fiber orientation with the load direction was improved. The analysis predicted that the structural ultimate load-bearing capacity increased to 2 320.9 N, with an error of only 4.4% compared to the jig test result of 2 427.1 N. The results indicate that the single-gate configuration for this injection-molded joint can effectively improve the overall load-bearing capacity of the structure. Furthermore, fiber orientation and the weld line have a significant impact on the local strength of injection-molded parts with SGF reinforced material. Process-structure coupled analysis, which accounts for strength reductions due to fiber orientation and the weld line, can accurately reflect the actual failure locations and load-bearing capacity of injection-molded parts with SGF reinforced material.

Keywords : process-structure coupling analysis ; short glass fiber reinforced composite ; fracture failure ; weld line ; fiber orientation

短玻纤(SGF)增强热塑性复合材料因具有较高的比强度、耐热性及成型效率,已广泛应用于汽车冷却系统连接件等结构部件中^[1-3]。其中,尼龙 66 (PA66)中添加 25%GF (PA66/GF25)的材料体系,因其在高温和受力环境下的良好综合性能,成为汽车冷却系统进出水口接头的首选材料之一^[3]。对于此类注塑件,其力学性能除受材料本身影响外,还与纤维取向、熔接线位置及注塑工艺参数密切相关^[4-5]。在多浇口充填条件下,熔体前沿汇合易形成熔接线区域,由于纤维连续性下降及分子链扩散不充分,该区域往往成为结构失效的薄弱位置^[6]。传统结构有限元分析通常采用均质各向同性材料模型,难以反映注塑过程中形成的纤维取向分布及熔接线对局部强度的影响,导致结构承载能力预测与实际工况存在偏差^[7-8]。

目前,针对含 GF 注塑件的工艺-结构耦合分析研究,多采用 Moldflow 预测纤维取向,并结合 Digimat 与 Ansys 进行结构性能分析,以提高各向异性材料力学响应预测精度^[9-10]。已有研究主要关注纤维取向对结构刚度及强度的影响,而对熔接线区域局部强度衰减及其与纤维取向共同作用下的失效行为研究相对较少^[11]。此外,部分研究仅基于标准试样开展分析,针对实际工程结构件在复杂工况下的断裂失效研究仍较有限。

本文以 PA66/ GF25 进出水口接头为研究对象,针对传统结构分析结果满足要求但实际工装试验发生断裂的问题,建立 Moldflow、Digimat、Ansys 工艺-结构耦合分析模型。在考虑 GF 取向影响的基础上,引入熔接线区域强度折减,对双浇口结构失效原因进行分析,并对浇注系统进行优化。通过仿真

与工装试验对比,研究纤维取向与熔接线共同作用下的结构失效特征,为含 GF 注塑件的结构分析与浇口设计提供参考。

1 问题描述与传统结构仿真分析

1.1 初始方案与传统结构仿真分析

该进出水口接头为管状结构件,主体壁厚均匀。初始模具设计方案采用两端侧浇口进胶(双浇口方案),旨在平衡充填压力并缩短流动路径。在 Moldflow 软件中,采用 PA66 /GF25 材料进行模流分析,推荐的工艺参数为熔体温度 290 °C,模具温度 70 °C。分析结果显示(如图 1 所示)充填过程顺畅,未出现明显的短射或困气问题。

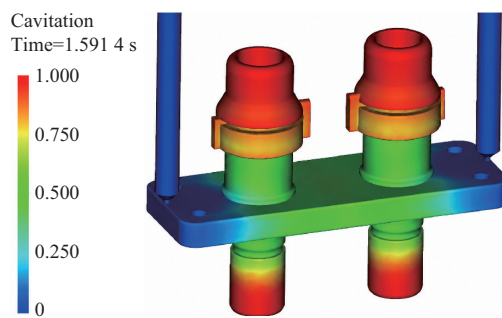


图 1 模流云图

Fig. 1 Moldflow contour

在产品开发前期,依据材料供应商提供的 PA66 /GF25 各向同性力学性能数据,在 Ansys 软件中进行了线性静力学分析。边界条件设置为工装底座固定,压头在接头主体上施加向下 10 mm 的强制位移(如图 2 所示)。

各向同性线弹性材料的本构关系遵循广义胡克定律,见式(1)。

$$\sigma = D: \varepsilon \quad (1)$$

式中: σ 为应力张量; ε 为应变张量; D 为仅由弹性模量 E 和泊松比 ν 确定的各向同性刚度张量。结构失效依据最大主应力准则或 Von Mises 屈服准则进行判定。Von Mises 等效应力 σ_{vm} 的表达式见式(2)。

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为三向主应力。当 σ_{vm} 超过材料的屈服强度时,即认为发生塑性变形或失效。表1为PA66/GF25材料的物性。由表1可知,该PA66/GF25材料的断裂强度为145 MPa。

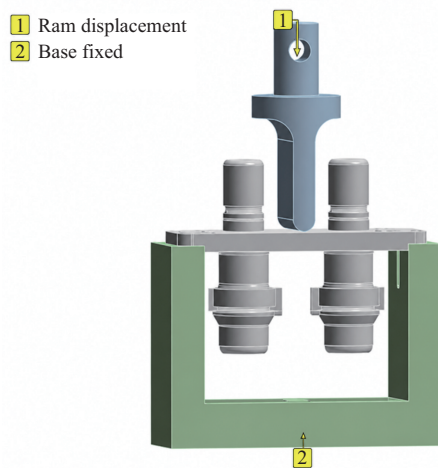


图2 边界条件

Fig. 2 Boundary conditions

表1 PA66/GF25的物性

Tab. 1 Physical properties table for PA66/GF25

Item	Values
Modulus of elasticity/MPa	10 400
Fracture strength/MPa	145
Fracture strain/%	2.60

在位移加载至10 mm过程中,通过最大主应力判断出失效点区域,如图3所示,并根据失效点区域的等效应力-位移作用面的支持反力(支反力)线图(如图4所示)可知,接头在发生断裂前可承受的最大支反力为2 352.1 N,远大于客户要求的1 200 N极限载荷。

基于上述各向同性分析的应力云图及对应的支反力解读,传统仿真可以得出的结论为:该双浇口设计方案安全可靠,满足强度设计要求。然而,这一解读完全忽视了熔接线区域的局部材料弱化效应和纤维取向导致的各向异性,因此该结果存疑。

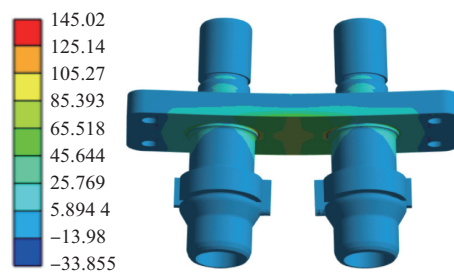


图3 最大主应力云图

Fig. 3 Maximum principal stress contour

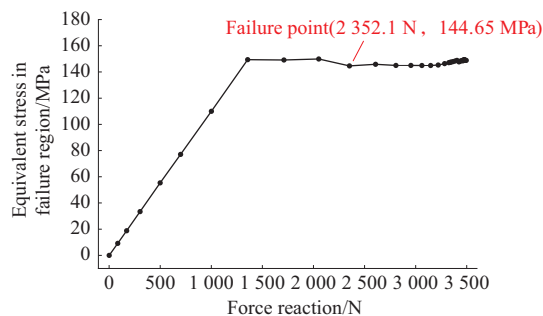


图4 失效点区域的等效应力-位移作用面的支反力线图

Fig. 4 The support reaction force lines diagram of equivalent stress-displacement interaction surface in failure zone

1.2 实际工装试验与失效现象

工装强度试验采用微机控制电子万能试验机进行,试验过程中产品两端通过专用工装进行固定约束,加载压头位于接头主体中部位置,通过位移控制方式施加竖向载荷,以模拟实际使用工况下的受力状态。加载速度设为2 mm/min,试验环境温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。每组方案测试5件样品,剔除异常数据后取平均值作为最终结果。试验过程中实时记录载荷-位移曲线,并以结构发生明显断裂时对应的峰值载荷作为极限承载能力。图5为双浇口工装试验及结果。

统计数据显示,产品在平均约1 079.03 N(见表2)的载荷下即发生断裂失效,且断裂位置均位于接头中部的特定截面(如图5所示)。这与传统仿真给出的2 352.1 N安全预测存在巨大偏差,直接导致了设计方案的失效。

2 基于联合仿真方法的浇注系统工艺优化

2.1 双浇口产品的工艺-结构耦合分析

为探究失效原因,引入了基于Moldflow、Digimat和Ansys的多尺度联合仿真方法^[7-8]。具体原理与步骤如下。

(1)模流分析与数据导出。

在Moldflow中详细分析双浇口方案的微观结构。图6为双浇口模流分析结果。由图6可见,在接

表 2 双浇口工装试验数据

Tab. 2 Dual-gate fixture test data

Sample number	Fracture force/N	Bending strength/MPa	Bending strain/%	Fracture bending stress/MPa	Fracture bending strain/%
1	1 017.3	610.38	2.22	610.38	2.22
2	1 137.5	682.5	2.48	682.5	2.48
3	1 070.18	642.11	2.27	642.11	2.27
4	1 083.65	650.19	2.30	650.19	2.30
5	1 086.53	651.92	2.34	651.92	2.34
Average	1 079.03	647.42	2.32	647.42	2.32
Standard deviation	42.97	25.78	0.098 6	25.78	0.098 6

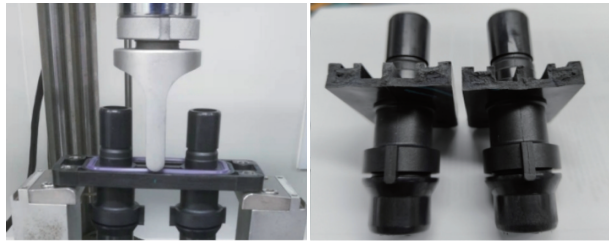


图 5 双浇口工装试验及结果

Fig. 5 Dual-gate fixture test and results

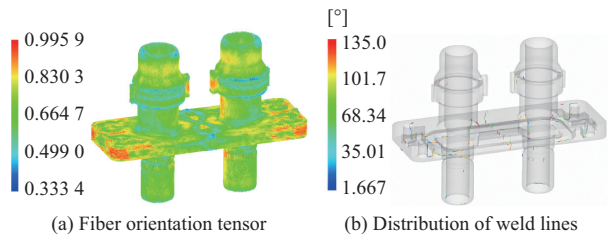


图 6 双浇口模流分析结果

Fig. 6 Moldflow analysis results for dual-gate

头中部区域存在明显的熔接线,该处纤维取向张量第一主成分显著低于周边区域,表明纤维在此处沿受力方向(垂直于熔接线)的取向度较差,且由于两股熔体相向交汇,纤维倾向于垂直于流动方向排列^[4]。

(2)材料建模及结构映射。

利用Digimat-MX模块对0°、45°和90°三个方向的样条拉伸真实应力-应变曲线进行逆向标定^[15],通过反迭代求解获得PA66基体的幂律硬化参数及GF增强相的微观力学性能(见表3),进而生成基于Mori-Tanaka均质化理论的多尺度材料卡片(如图7所示)。针对双浇口方案中必然存在的熔接线区域,在材料卡片中引入强度折减系数0.352,以表征该处纤维搭接不连续导致的承载能力弱化^[3,9]。随后,在Digimat-MS映射模块中将Moldflow注塑分析所得的节点纤维取向张量场及熔接线位置信息,通过积分点插值算法精确映射至Ansys的高阶六面体结构网络上(如图8、图9所示),确保工艺历史信息在跨尺度传递过程中的完整性与数值精度^[10]。

(3)各向异性结构求解。

表 3 Digimat-MX 逆向标定优化后的各项参数

Tab. 3 Parameters optimized through reverse calibration of Digimat-MX

Parameters	Optimized values
Hardening modulus/MPa	50.926
Hardening exponent	298.02
Linear hardening modulus/MPa	17.5
Aspect ratio	27.41
Axial tensile strain/%	2.236 2
Inplane tensile strain/%	2.867 7
Transverse tensile strain/%	7.373 9

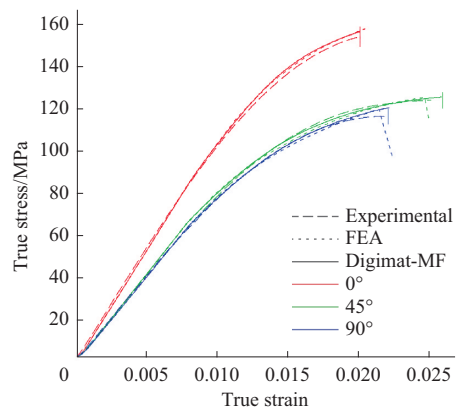


图 7 Digimat-MX 逆向标定材料卡片

Fig. 7 Reverse calibration of material card in Digimat-MX

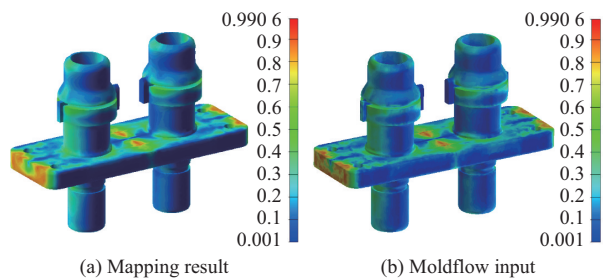


图 8 Digimat-MS 双浇口纤维取向映射

Fig. 8 Fiber orientation mapping via Digimat-MS for dual-gate scheme

在Ansys中导入映射后的材料属性,进行与工装试验工况一致的非线性求解,采用Tsai-Hill准则判定失效^[5]。Tsai-Hill准则适用于各向异性材料,形式直观,且参数确定简单,是最传统复合材料通用失效准则之一^[11],由Hill提出了以应力二次项加权

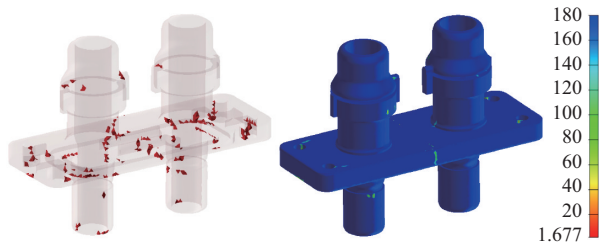


图9 Digimat-MS 双浇口熔接线映射

Fig. 9 Weld line mapping via Digimat-MS for dual-gate scheme

和来表达的失效准则,最初主要应用于各向异性的金属板料,而Tsai将其应用于复合材料当中。Tsai-Hill准则表达式见式(3)^[12]。其中, X, Y, Z 表达式见式(4)至式(6)。

$$F = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{33}^2}{Z^2} + \frac{\tau_{23}^2}{X_s^2} + \frac{\tau_{12}^2}{X_s^2} + \frac{\tau_{13}^2}{X_s^2} - \sigma_{11}\sigma_{22}\left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}\right) - \sigma_{11}\sigma_{33}\left(\frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2}\right) - \sigma_{22}\sigma_{33}\left(-\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2}\right) \quad (3)$$

$$X = \begin{cases} X_T; & \sigma_{11} \geq 0 \\ X_C; & \sigma_{11} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

表4 网格无关性验证

Tab. 4 Mesh independence verification

Mesh size/mm	Number of cells	Maximum principal stress/MPa	Displacement reaction forces/N	Error relative to the 0.4 mm mesh
1.0	396 800	89.74	1 149.3	3.81%
0.8	681 320	92.60	1 184.1	0.90%
0.4	3 076 223	93.41	1 194.8	—

图10为双浇口Pseudo Grain失效模型的失效指标(FPGF)云图。在图10中,应力集中区域及失效起始点精确匹配了Moldflow预测的熔接线位置。根据材料供应商提供的物性表可知,该PA66/GF25材料的熔接线折减后的断裂强度约为94 MPa。根据图10及最大主应力结果可知,当FPGF值接近1时,熔接线区域首先发生失效,此时对应位移作用面的支反力可根据图11中的曲线点判断,约为1 184.1 N,并且该区域应力水平已接近熔接线折减后的等效强度水平。

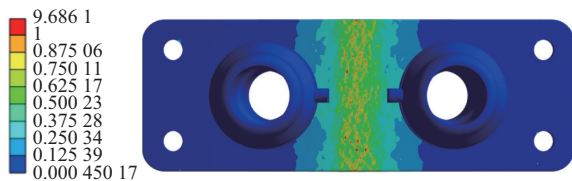


图10 双浇口FPGF云图(受拉侧FPGF刚到达1)

Fig. 10 FPGF contour of dual-gate scheme (FPGF reaching 1 at the tensile side)

$$Y = \begin{cases} X_T, & \sigma_{22} \geq 0 \\ X_C, & \sigma_{22} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Z = \begin{cases} X_T, & \sigma_{33} \geq 0 \\ X_C, & \sigma_{33} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(3)至式(6)中: F 为失效状态, $F < 1$ 表示材料处于安全状态, $F > 1$ 表示材料已经失效; σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 分别为应力分量; τ_{12} 、 τ_{13} 、 τ_{23} 分别为剪切应力分量; X, Y, Z 分别为弹性主方向的强度; X_T 为基体拉伸强度; X_C 为基体压缩强度; X_s 为基体剪切强度。

(4)网格无关性验证。

由表4可知,随着网格尺寸减小,最大主应力及对应位移支反力结果逐渐趋于稳定。其中,0.8 mm网格与0.4 mm网格对应位移作用面的支反力误差仅为0.90%(见表4),最大主应力误差仅为0.87%,均已收敛,说明结构计算结果已基本达到网格无关性要求。考虑到0.4 mm网格单元数量较大,联合仿真计算时间明显增加,而0.8 mm网格在保证计算精度的同时具有更高的计算效率,因此后续仿真均采用0.8 mm结构网格进行计算。

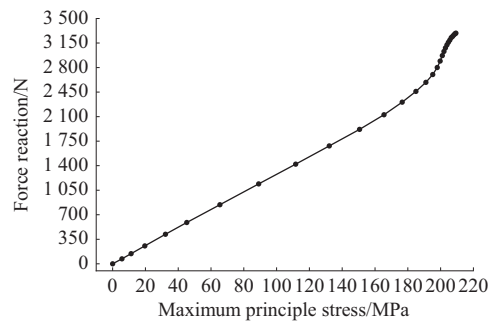


图11 双浇口方案最大主应力-位移作用面的支反力曲线图

Fig. 11 Graph of support reaction forces on the maximum principal stress-displacement plane for dual-gate design

2.2 失效机理分析与优化策略

根据第一章的分析,双浇口方案中位于接头中部承载区的熔接线是导致强度不足的根源。该PA66/GF25材料,熔接线处的强度保持率仅为基体强度的60%~80%,即便有GF增强,该区域由于纤维未能跨越界面传递载荷,其强度甚至低于纯基体材料^[5,13]。

通过调整浇口位置和数量来改变熔体流动模

式和前锋交汇位置,是最直接有效的工艺优化手段^[7]。因此,鉴于接头主体呈对称管状,若采用单点进浇(将浇口移至接头一端,另一端作为充填末端),熔体将呈“泉涌”状向前推进,虽然流动路径变长,但是能够确保在主要承载段形成单一的流动前锋,从而消除熔接线。Moldflow 对该方案进行模流分析,结果可见。

(1)充填模式:熔体由一端平稳流向另一端,流动前沿连续,在接头中部及主体区域无熔接线生成(如图 12 所示)。熔接线被推移至充填末端非关键区域。

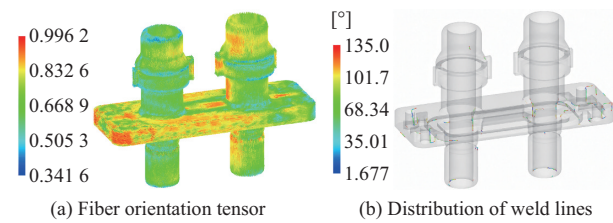


图 12 单浇口模流分析结果

Fig. 12 Moldflow analysis results for single-gate

(2)纤维取向:由于受到持续稳定的剪切流作用,接头主体区域的 GF 沿流动方向(即接头轴向)呈现出高度一致的取向分布。对于承受压头弯曲载荷的接头,这种轴向高度取向的纤维分布能最大限度发挥 GF 的增强效果,显著提升弯曲刚度与强度^[4,14,16]。

2.3 单浇口产品的工艺-结构耦合分析

对优化后的单浇口方案进行分析,边界条件与前述一致。仿真分析结果显示,高应力区转移至接头结构的端部,接头中部原熔接线区域应力水平正常,不再是失效薄弱点。根据 FPGF 云图(如图 13 所示)及对应的最大主应力-位移作用面的支反力曲线(如图 14 所示),当支反力为 2 320.9 N 时,接头结构端部发生断裂失效。单浇口样件工装试验结果见表 5,产品在 2 427.1 N 载荷作用下发生断裂,断裂位置位于接头主体与连接段的过渡圆角处(如图 15 所示),与仿真预测结果一致。与双浇口方案相比,单

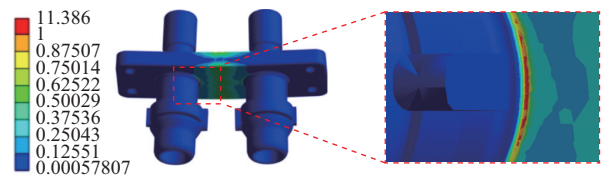


图 13 单浇口 FPGF 云图(右图为接头端部的局部放大图)

Fig. 13 FPGF contour of single-gate scheme (Right: Enlarged view of connector end region)

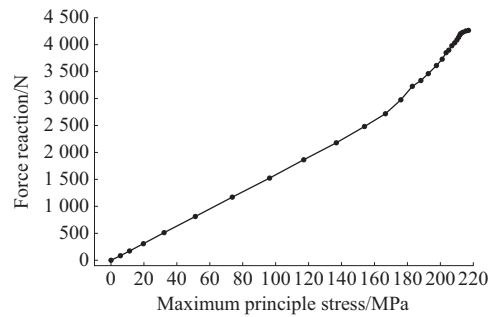
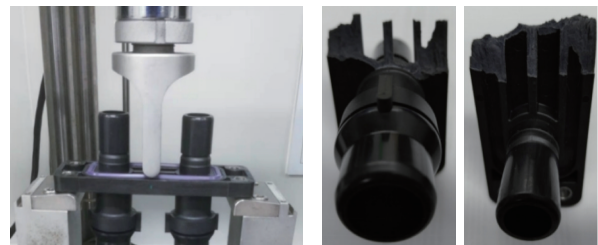


图 14 单浇口方案最大主应力-位移作用面的支反力曲线图

Fig. 14 Graph of support reaction forces on the maximum principal stress-displacement plane for single-gate design



(a)Test equipment diagram (b)Test sample failure diagram

图 15 单浇口工装试验及结果

Fig. 15 Single-gate fixture test and results

浇口方案消除了结构中中部熔接线缺陷,纤维取向连续性得到改善,失效位置由熔接线区域转移至几何过渡区域。由于过渡圆角处存在截面突变,在外载荷作用下易形成局部应力集中,同时该区域承担较大的弯曲拉伸载荷,因此成为结构中的薄弱部位并首先发生断裂。所以经过浇口优化后,结构失效已由工艺缺陷主导转变为几何结构主导,与工艺-结构耦合分析预测结果相符。

表 5 单浇口工装试验数据

Tab. 5 Single-gate fixture test data

Sample number	Fracture force/N	Bending strength/MPa	Bending strain/%	Fracture bending stress/MPa	Fracture bending strain/%
1	2 530.77	1 518.46	2.92	1 518.46	2.92
2	2 533.65	1 520.19	3.04	1 520.19	3.04
3	2 337.49	1 402.50	2.77	1 402.50	2.77
4	2 336.54	1 401.92	2.79	1 401.92	2.79
5	2 397.11	1 438.27	2.83	1 438.27	2.83
Average	2 427.11	1 456.27	2.87	1 456.27	2.87
Standard deviation	99.03	59.42	0.11	59.42	0.11

3 仿真结果和试验数据对标验证

表6为单双浇口方案的仿真与试验对比。由表6可知,仿真与试验结果的误差再次保持在10%以内,且准确预测了失效位置的迁移。这不仅验证了单浇口方案的有效性(承载能力提升超过120%,满

足客户要求),更有力地证明了基于Moldflow、Digimat和Ansys的工艺-结构耦合分析模型在SGF注塑件的开发全流程中具有较好的预测精度。结构极限承载能力提升至2 320.9 N,与工装试验结果2 427.1 N误差仅为4.4%。

表6 单、双浇口方案的仿真与试验对比

Tab. 6 Simulation and experimental comparison of single gate and double gates designs

Item	Co-simulation of dual gates design	Co-simulation of single gate design	Traditional structural simulation of dual gates design
Simulation values/N	1 184.1	2 320.9	2 352.1
Experimental ultimate load value/N	1 079.0	2 427.1	1 079.0
Error values/%	9.7	4.4	118.0

4 结论

(1) SGF增强PA66注塑件的失效行为与工艺诱导的微观结构密切相关,工艺-结构耦合分析可更准确地表征其力学响应与失效特征。传统各向同性结构分析难以准确反映SGF增强的PA 66(PA66/GF25)注塑件的真实受力行为。双浇口方案传统结构仿真预测极限载荷可达2 352.1 N,而实际工装试验平均断裂载荷仅为1 079.0 N,误差超过100%。采用基于Moldflow-Digimat-Ansys的工艺-结构耦合分析后,仿真预测双浇口方案极限载荷为1 184.1 N,与试验结果误差控制在10%以内(9.7%),能够较准确预测该接头结构的失效位置及承载能力变化规律。

(2)双浇口方案中,两股熔体在接头中部交汇形成熔接线区域,导致局部纤维取向连续性下降,并产生明显应力集中。结果表明,熔接线区域首先达到Tsai-Hill失效准则,最大主应力接近熔接线折减后的等效强度极限,裂纹扩展方向与实际断口位置具有较好一致性,说明纤维取向及熔接线对含GF注塑件局部强度具有显著影响。

(3)通过对浇注系统进行优化,将双浇口结构调整单浇口方案后,产品熔接线位置得到有效消除,纤维主取向沿载荷方向分布更加连续,结构整体承载能力明显提高。仿真预测单浇口方案断裂失效时对应位移作用面的支反力为2 320.9 N,较双浇口方案提高约96%;工装试验结果表明,其平均断裂载荷提升至2 427.1 N,较原方案提高约125%,验证了浇口优化方案的有效性。

参考文献

- [1] 张玉丽,邱炜,傅南红,等.基于多尺度联合仿真的注塑制品轻量化设计[J].中国塑料,2018,32(9):130-134.
ZHANG Yuli, QIU Wei, FU Nanhong, et al. Lightweight design of

- injection molded products based on multi-scale co-simulation[J]. China Plastics, 2018, 32(9):130-134.
- [2] 查燕,郑方莉,肖剑,等.多尺度联合仿真在汽车注塑零件轻量化设计中的应用研究[J].中国塑料,2021,35(8):112-116.
ZHA Yan, ZHENG Fangli, XIAO Jian, et al. Research on the application of co-simulation in the reduced design of automotive injection parts[J]. China Plastics, 2021, 35(8):112-116.
- [3] ISAINCU A, DAN M, UNGUREANU V, et al. Numerical investigation on the influence of fiber orientation mapping procedure to the mechanical response of short-fiber reinforced composites using Moldflow, Digimat and Ansys software[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45:4 304-4 309.
- [4] 欧阳宇,刘泓滨,李振森,等.基于Moldflow和Ansys联合仿真对进气歧管注射成型及进气性能优化的研究[J].中国塑料,2023,37(3):71-76.
OUYANG Yu, LIU Hongbin, LI Zhenmiao, et al. Study on injection molding and intake performance optimization of intake manifold based on Moldflow-Ansys joint simulation[J]. China Plastics, 2023, 37(3):71-76.
- [5] 姜旭,解锴,王晓宏,等.基于多尺度联合仿真的短切CFRP注塑制件的力学性能分析[J].塑料科技,2025,53(4):161-165.
JIANG Xu, XIE Kai, WANG Xiaohong, et al. Mechanical property analysis of short-cut CFRP injection molded parts based on multi-scale joint simulation[J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(4):161-165.
- [6] 刘昕宇,黄瑶.基于顺序注塑的大型双色注塑件翘曲研究[J].现代塑料加工应用,2024,36(4):40-43.
LIU Xinyu, HUANG Yao. Study on warping of large two-color injection molded parts based on sequential injection molding[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2024, 36(4):40-43.
- [7] 马镜涵,刘泓滨,汪鑫.基于响应面模型与人工鱼群算法的汽车车门内饰柱注塑成型优化设计[J].工程塑料应用,2023,51(3):64-68.
MA Jinghan, LIU Hongbin, WANG Xin. Optimal design of injection molding of automotive door interior columns based on response surface model and artificial fish swarm algorithm[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3):64-68.

- [8] ADAM L, ASSAKER R. Integrated nonlinear multi-scale material modelling of fiber reinforced plastics with digimat: Application to short and continuous fiber composites[C]//Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, Spain: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2014:1-12.
- [9] 张立强,刘飞,薛志刚,等.基于多尺度联合仿真的汽车前罩刚度分析[J].塑料工业,2019,47(4):73-77,82.
ZHANG Liqiang, LIU Fei, XUE Zhigang, et al. Stiffness analysis of vehicle hood based on multi-scale co-simulation[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(4):73-77, 82.
- [10] ROMANOV V, LOMOV S V, SWOLFS Y, et al. Statistical analysis of real and simulated fibre arrangements in unidirectional composites[J]. Composites Science and Technology, 2013, 87: 126-134.
- [11] 谈炳东,郑健,许进升,等.短纤维增强三元乙丙薄膜拉伸破坏率相关 Tsai-Hill 强度准则[J].复合材料学报,2018,35(6):1 646-1 651.
TAN Bingdong, ZHENG Jian, XU Jinsheng, et al. Rate dependent Tsai-Hill strength criterion for short fiber reinforced EPDM film in tensile failure process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6):1 646-1 651.
- [12] 唐占文.考虑界面相的复合材料宏-细观渐进损伤解析模型研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- TANG Zhanwen. Study on interphase-domain macro-micro progressive damage analytic model for composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [13] 柏宏,刘晶,彭丹,等.基于联合仿真分析的复合材料尾门轻量化设计[J].时代汽车,2020(14):128-130.
BAI Hong, LIU Jing, PENG Dan, et al. Lightweight design of composite material based on co-simulation analysis[J]. Auto Time, 2020(14):128-130.
- [14] ARRIAGA A, VAN DEN BROEK S J J, GOVAERT L E, et al. On the assessment of strength and durability of weld lines in injection-moulded unreinforced and short glass fiber reinforced polypropylene[J]. Polymer Testing, 2025, 153. DOI: 10.1016/j. polymertesting.2025.109035.
- [15] 段成红,吴港本,罗翔鹏.基于 DIGMAT 的碳纤维增强环氧树脂编织复合材料的力学性能[J].纺织学报,2023,44(7):126-131.
DUAN Chenghong, WU Gangben, LUO Xiangpeng. Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin woven composites based on DIGMAT[J]. Journal of Textile Research, 2023, 44 (7):126-131.
- [16] BARADI M B, CRUZ C, RIEDEL T, et al. Mechanical and microstructural characterization of flowing weld lines in injection-molded short fiber-reinforced PBT[J]. Polymer Testing, 2019, 74: 152-162.