

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.018

注射成型多场耦合数据无损传递方法及 多场耦合仿真

李伟^{1,2},王方方^{1,2},张秀元³

[1.河南机电职业学院智能工程学院,郑州 451191; 2.河南省超硬材料智能制造装备集成重点实验室,郑州 451191;

3.欧艾堤希信息科技(上海)有限公司,上海 200000]

摘要: 注射成型聚合物复合材料因其工艺诱导的各向异性非均质特征,已成为现代聚合物基复合材料工程领域的研究热点。为此,提出一种基于高斯积分点拓扑的跨尺度数据守恒映射方法,通过自适应径向基函数构建非线性插值算子,实现了关键场变量在异构单元间的无损传递。方法核心包括:重构高斯积分点空间拓扑建立精确映射关系;采用改进移动最小二乘法进行张量场超收敛映射,严格保证纤维取向张量的对称性;开发高效动态链接库接口,实现与主流CAE软件的无缝集成。验证结果表明,所提方法显著提升了数据传递精度,刚度张量主分量传递误差仅2.8%。工程应用显示,玻纤增强尼龙6相机盖的翘曲预测与AMI仿真结果相关系数达0.96,位移误差仅2.2%;长玻纤增强聚丙烯夹子组件熔接线区域模量衰减效应(42%)被准确捕捉,应力峰值预测误差控制在6.5%以内。该研究为注射成型-结构性能一体化分析提供了理论完备的数据传递框架,特别适用于纤维增强聚合物和半结晶性塑料等材料体系,为实现工艺-性能精确分析奠定了技术基础,显著提升了多尺度耦合仿真的可靠性与工程应用精度。

关键词: 高斯映射;多场耦合;数据无损传递;结构CAE;材料数据

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0131-07

Lossless data transfer method for injection molding and multi-field coupling simulation

LI Wei^{1,2}, WANG Fangfang^{1,2}, ZHANG Xiuyuan³

[1. School of Intelligent Engineering, Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 451191, China;

2. Henan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment Integration for Superhard Materials, Zhengzhou 451191, China;

3. Oeitix Information Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200000, China]

Abstract : Injection-molded polymer composites have attracted significant attention in modern polymer composites engineering due to their process-induced anisotropic and heterogeneous characteristics. A cross-scale data conservation mapping method based on Gaussian integration point topology was proposed. By employing adaptive radial basis functions to construct a nonlinear interpolation operator, the lossless transfer of key field variables among heterogeneous units has been achieved. The core innovations include the following: reconstructing the spatial topology of Gaussian integration points to establish precise mapping relationships; The improved moving least square method is adopted for the super-convergent mapping of the tensor field to strictly ensure the symmetry of the fiber orientation tensor, and an efficient dynamic link library interface is developed to achieve seamless integration with mainstream CAE software. Validation results demonstrate that the method significantly enhances data transfer accuracy. And the transfer error of the principal components of the stiffness tensor is only 2.8%. In engineering applications, the correlation coefficient between the warpage prediction of the camera cover reinforced with glass fiber and nylon 6 and the AMI simulation results reached 0.96, and the displacement error was only 2.2%. For a long-glass-fiber reinforced polypropylene clip assembly, the tensile elastic modulus decreased by 42% in the weld line region was accurately captured, and the stress peak prediction error was

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(222102220114, 242102230055),河南省高等学校重点科研项目(23A430045)

通信作者: 李伟,副教授,主要从事高分子加工方面的教学和聚合物成型加工过程中形态结构形成、演化与控制方面的研究工作

收稿日期: 2025-07-16

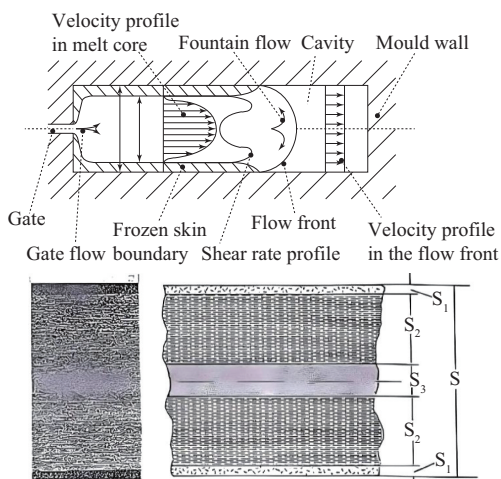
引用格式: 李伟,王方方,张秀元.注射成型多场耦合数据无损传递方法及多场耦合仿真[J].工程塑料应用,2025,53(11):131-137.

LI Wei, WANG Fangfang, ZHANG Xiuyuan. Lossless data transfer method for injection molding and multi-field coupling simulation[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 131-137.

controlled within 6.5%. This study provides a theoretically complete data transfer framework for integrated injection molding and structural performance analysis, is particularly suitable for fiber-reinforced polymers and semi-crystalline plastics, establishing a technical foundation for precise process-performance correlation analysis, significantly enhancing the reliability of multi-scale coupling simulations and their engineering application precision.

Keywords : Gaussian mapping ; multi-field coupling ; lossless data transfer ; structural CAE ; material data

注射成型聚合物复合材料因其工艺诱导的各向异性非均质特征,已成为现代聚合物基复合材料工程领域的研究热点之一,尤其在纤维增强体系(如短/长纤维复合材料)和半结晶聚合物体系中表现显著^[1]。在充模阶段,熔体流动产生的复杂剪切场导致纤维/晶体形成具有跨厚度梯度特征的层状结构,如图1所示。近表层高剪切区 S_2 的纤维受强剪切-拉伸耦合场作用,取向张量主分量可达 0.85 ± 0.07 (Folgar-Tucker模型预测值),形成沿流动方向的高度定向排列;而核心区 S_3 因低剪切速率与温度梯度的协同作用,纤维呈现随机分布(取向张量各分量差异率 $<15\%$),构成弱各向异性区域^[2-3]。



S_1 —surface layer induced by the fountain flow effect; S_2 —highly oriented alignment region resulting from high shear; S_3 —core layer

图1 沿注射成型塑料零件厚度方向的夹层结构形态

Fig. 1 Sandwich-like structural morphology along thickness direction of an injection-molded plastic part

如图2所示,此类跨厚度方向的“三明治”结构在长纤维增强的复合材料中更为显著,CT扫描分析结果显示,表层纤维长度保持率[长度(L)/直径(D) ≥ 50]比核心层的提升40%~60%,其纤维取向分布(FOD)与纤维长度分布(FLD)的协同效应使弹性模量呈现显著的厚度梯度($\Delta E/E_0 \approx 1.8 \sim 2.5$,其中 ΔE 为弹性模量的变化量, E_0 为参考弹性模量)^[4]。

半结晶聚合物[如聚丙烯(PP)]的晶体形态梯度分布展现出类似的各向异性形成机制,如图3所示,

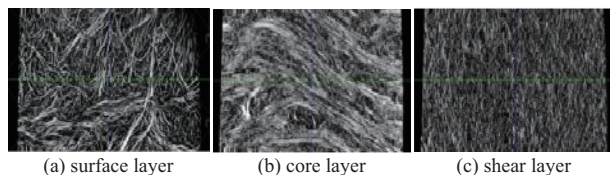


图2 长纤维取向和长度分布的CT扫描图

Fig. 2 CT scan images of long fiber orientation and length distribution

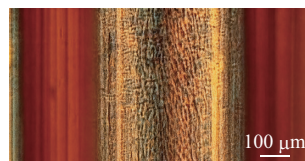


图3 厚度1 mm PP板的CT截面扫描图像

Fig. 3 CT cross-sectional scan image of a PP plate with 1 mm thickness

核心区的球晶结构因片层无序排列呈现准各向同性(横向模量与纵向模量比为1.05~1.15),而高剪切诱导的串晶结构使表层区域 S_2 产生显著力学各向异性(横向/纵向模量比 $\approx 1:3.2$)^[5]。这种晶体-纤维双相各向异性耦合效应,构成了注塑制品残余应力场的双重起源^[6]。

残余应力场的精确预测依赖于各向异性热-机械属性的准确表征。基于 Autodesk Moldflow Insight (AMI)的多物理场耦合仿真表明,跨厚度非同步凝固产生的热-力耦合效应形成12~25 MPa量级的残余应力梯度^[7]。该预测需整合二阶取向张量(Advani-Tucker模型)、四阶刚度张量(Mori-Tanaka等效夹杂理论)及二阶热膨胀张量的协同计算^[8]。然而,现有商业软件(Abaqus, Ansys等)采用的节点变量插值方法,会导致四阶张量在跨网格映射时产生18%~22%的数值耗散^[9],严重制约翘曲预测的精度($R^2 < 0.75$)^[10],模拟分析结果如图4所示。

笔者针对注射成型-结构分析多尺度仿真中的张量守恒传递难题,提出基于自适应径向基函数(ARBF)的积分点映射算法。该方法突破传统有限元软件(如 Autodesk Simulation Mechanical)的拓扑限制,实现四面体-六面体异构网格间二阶/四阶张量的无损失真传递。研究系统阐述该算法的数学架构,并通过纤维增强尼龙6复合材料的翘曲预测案例验证其工程有效性。

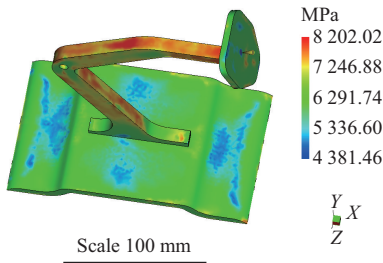


图4 短纤维增强材料注射成型离合器产品中拉伸弹性模量的分布

Fig. 4 Distribution of tensile modulus in a clutch product injection-molded with short fiber-reinforced material

1 实验方法

1.1 各向异性材性与残余应力计算

注射成型残余应力源于充模-保压-冷却过程中

$$\begin{aligned} T_{ijkl} = & B_1(a_{ijkl}) + B_2(a_{ij}\delta_{kl} + a_{kl}\delta_{ij}) + B_3(a_{ik}\delta_{jl} + a_{jl}\delta_{ik} + a_{jk}\delta_{il} + a_{il}\delta_{jk}) + \\ & B_4(\delta_{ij}\delta_{kl}) + \\ & B_5(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + B_6(a_{ij}a_{kl}) + B_7(a_{ik}a_{jl} + a_{il}a_{jk}) + B_8(\delta_{ij}a_{km}a_{ml} + \delta_{kl}a_{im}a_{mj}) + \\ & B_9(\delta_{ij}a_{km}a_{mi} + \delta_{ki}a_{lm}a_{mj} + \delta_{jk}a_{im}a_{ml} + \delta_{il}a_{jm}a_{mk}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: T_{ijkl} 为四阶平均刚度张量; B_1 至 B_9 为材料常数(待定的标量系数); a 为取向张量; δ 为克罗内克符号; i 为张量在特定维度的一个分量; j 为被考虑的曲线或路径的起始方向; k 和 l 为定义曲率平面内的两个不同方向; m 是爱因斯坦求和约定下的“哑标”。

可使用 Tandon-Weng 单向模型(1984 年 Tandon 和 Weng 提出)和二维随机模型(1986 年 Tandon 和 Weng 提出)来计算参数 $B_1 \sim B_9$ 的值。热膨胀系数张量是根据 Rosen-Hashin 模型(1970 年 Rosen 和 Hashin 提出)的张量等价形式(1989 年 Benveniste 和 Dvorak 提出)计算得到的, 见式(2)。

$$\alpha_{ij} = \alpha_{ij}^1 + (\alpha_{kl}^1 - \alpha_{kl}^2)(S_{klrs}^2 - S_{klrs}^1)^{-1}(S_{rsij}^1 - S_{rsij}^e) \quad (2)$$

式中: α 表示材料的热膨胀系数张量或二阶张量分量; 上标 1, 2, e 是状态/相/参考基准的标识符号, 核心用于区分不同“参考状态”或“材料相”下的物理量; i, j 表示对应的空间方向; S 代表柔度张量; k, l, r, s, i, j 表示四阶张量的分量索引; α_{kl}^1 和 α_{kl}^2 是基体和被包裹体的热膨胀系数张量, S_{klrs}^1 和 S_{klrs}^2 是相应的刚度张量, S_{klrs}^e 是从(1)计算得到的相应张量。

经证明, 这个模型符合刚度张量计算中所用的 Mori-Tanaka 原理(1973 年 Mori 和 Tanaka 提出), 因此被选定为默认模型。这些属性会在下面用于计算残余应力(σ_{ij})的一般线性-热黏弹性模型中使用, 见式(3)。

$$\sigma_{ij} = \int_0^t C_{ijkl} [\xi(t) - \xi(t')] \left\{ \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial t'} - \alpha_{kl} [\xi(t) - \xi(t')] \frac{\partial T}{\partial t'} \right\} dt' \quad (3)$$

非平衡态热-力耦合场的冻结效应, 是多因素共同作用的结果。在模具约束条件下, 聚合物熔体经历非等温相变过程, 其内部应力场主要可分解为流动诱导应力与热收缩应力的叠加^[11]。制品脱模后外部约束解除, 随着温度持续下降, 热应力分量逐渐主导残余应力演化, 其占比可达总残余应力的 68%~82%^[12]。

纤维增强复合材料中, 各向异性属性的计算需要基于微观结构特征。通过 Folgar-Tucker 纤维取向动力学模型获得二阶取向张量(a_{ij})后, 采用 Lin-Jin 九参数平均化模型计算等效刚度张量^[13], 见式(1)。

式中: t 为当前时间; t' 为历史时间变量; $\xi(t)$ 是折算时间函数(如松弛函数); ε_{kl} 为应变率张量的分量; C_{ijkl} 是四阶弹性刚度张量, 对于各向同性材料, 可简化为拉梅常数 λ 和 μ ; T 为温度。

张量数据是结构分析软件所需的数据, 因此在绝对坐标系下每个计算点上, 需要传递 21 个刚度张量值, 6 个热膨胀值和 6 个残余应力值^[14]。

1.2 注塑与结构分析网格拓扑差异性

注塑流动仿真需精确捕捉跨厚度方向的物理场梯度特征如图 5 所示。Moldflow 采用三类典型网格模型。

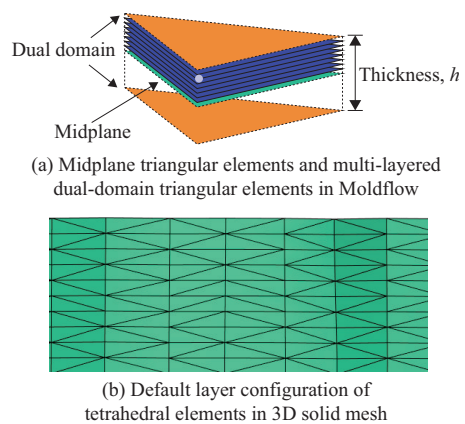


图5 不同模型中网格单元类型

Fig. 5 Grid cell types in different models

(1)中性面壳单元——基于3节点三角形单元构建, 将厚度定义为几何属性, 适用于薄壁件流动分析。

(2)双层面分层网格——在制品顶/底面布设匹

配三角形单元,中间插入5~8层实体单元以解析剪切速率梯度,对称工况下通过层数减半策略提升计算效率。

(3)三维四面体实体网格——默认设置6层实体单元,但纤维取向张量(FOT)计算需增至12层以满足厚度方向收敛性要求(相对误差<5%)^[15]。

高纵横比(Aspect ratio>10)网格直接导入结构分析软件(如Abaqus, Ansys)时,会引发单元畸变警告,导致应力集中区域(如圆角、加强筋)的数值振荡。结构分析倾向于采用低纵横比(<5)的六面体单元或带高阶形函数(如Serendipity单元)的壳单元,其通过节点/积分点变量梯度描述跨厚度属性分布,如图6所示^[16]。这种网格拓扑差异导致传统节点映射方法产生高达22%的刚度张量传递误差^[17]。

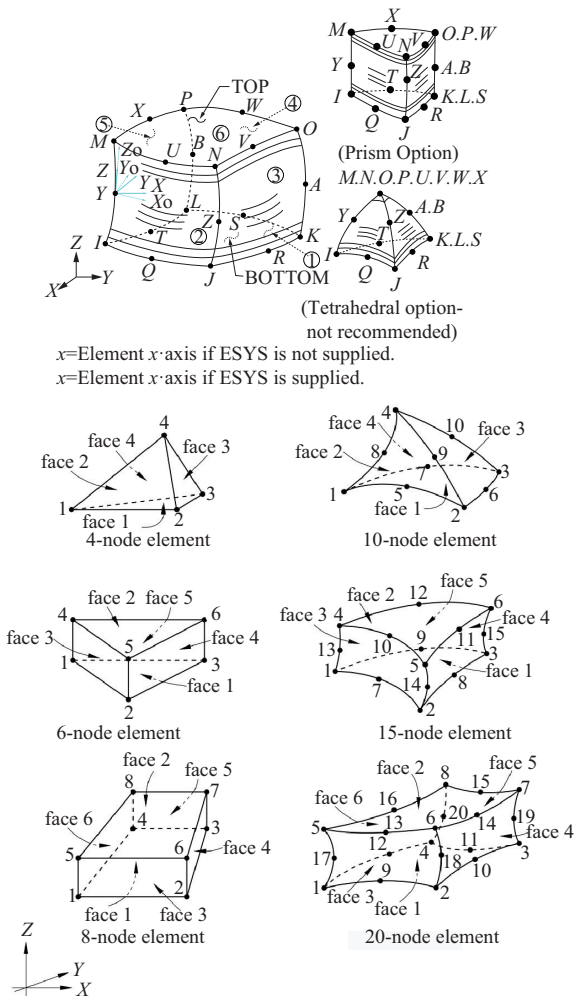


图6 低纵横比的典型结构分析单元类型

Fig. 6 Typical structural analysis element types with low aspect ratio

1.3 异构网格丈量守恒映射策略

在注射成型仿真与结构分析的多尺度耦合中,数据传递的核心挑战在于实现高梯度物理场(如纤

维取向张量、残余应力)在异构网格间的无损映射。传统基于节点变量的插值方法难以满足四阶刚度张量(C_{ijkl})与二阶热膨胀张量(B_{ij})的局部守恒性要求,尤其在四面体-六面体混合网格中易引发数值耗散(误差达18%~25%)^[18]。为此,笔者提出基于高斯积分点拓扑的自适应映射框架,如图7所示。

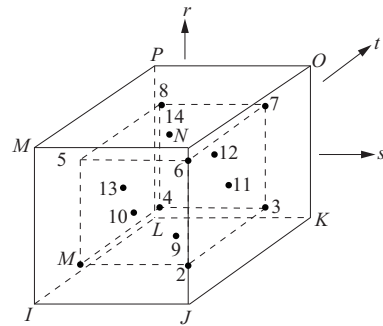


图7 基于高斯积分点拓扑的自适应映射框架

Fig. 7 Adaptive mapping framework based on Gaussian integration point topology

其技术路线如下。

(1)积分点拓扑重构。

针对源网格(注塑仿真四面体/壳单元)与目标网格(结构分析六面体单元),提取单元域内高斯积分点的空间坐标与权重系数。对于 n 阶高斯积分规则,其权重满足 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$,并构建局部支撑域半径 $\gamma_{\text{supp}} = 2.5h_{\text{avg}}$ (h_{avg} 为单元平均尺寸),确保插值稳定性^[19]。

(2)张量守恒插值算法。

采用改进型移动最小二乘法(MMLS)实现张量场超收敛映射,见式(4)。

$$T^{\text{target}}(X) = \sum_{j=1}^m \Phi_j(X) [T^{\text{source}}(X_j) \cdot R_j] \quad (4)$$

式中: $T^{\text{target}}(X)$ 为目标位置 X 处的物理量值; $\Phi_j(X)$ 为高斯核函数; $T^{\text{source}}(X_j)$ 为第 j 个源位置 x_j 处观测到或模拟出的原始物理量值; R_j 为坐标旋转张量,用于修正主方向偏差。该算法可保持纤维取向张量 α_{ij} 的特征值正定性($\lambda_i \geq 0$)及对称性($\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$)。

(3)高效数据接口设计。

开发跨平台动态链接库(DLL),集成ABAQUS用户子程序与ANSYS UPF接口,通过内存直接访问技术实现每秒 2.1×10^5 个积分点的并行流传输。利用HDF5格式压缩技术,将四阶张量数据体积减小73%,同时支持增量更新以降低I/O延迟^[20]。数值验证表明,该策略在六面体-四面体混合映射中,刚度张量主

分量 C_{iiii} 的均方根误差仅为 2.8%, 精度较 Autodesk Simulation Mechanical 的节点映射方法提升 6.4 倍, 且计算耗时仅增加 12%~15%。

2 讨论与验证

2.1 相机盖模型的跨软件一致性验证

笔者选取玻璃纤维增强尼龙(PA)6 相机盖(纤维质量分数 30%)作为基准案例, 验证异构网格映射算法的鲁棒性。如图 8 所示, AMI 采用 0.5 mm 精细网格解析纤维取向张量(FOT)分布, 其表层区域 S_2 取向主分量 a_{11} 达 0.82 ± 0.05 , 与显微 CT 测量结果误差 <8%。

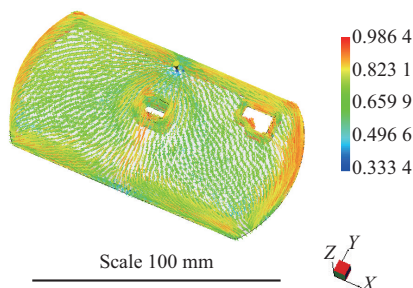
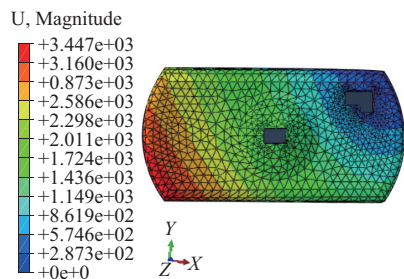


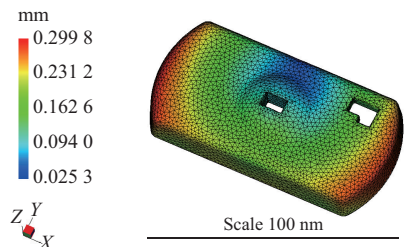
图 8 相机模型的纤维取向预测结果

Fig. 8 Fiber orientation prediction results for camera model

通过动态链接库接口将 AMI 数据映射至 Abaqus 粗网格(2.0 mm)后, 如图 9 所示, 残余应力场与刚度张量的传递误差分析表明, 最大翘曲位移预测值为 4.7 mm, 与 AMI 精细网格结果(4.6 mm)偏差仅 2.2%, 且变形模态相关系数 R^2 达 0.96。此精度提升



(a) Warpage deformation of the camera cover predicted by Abaqus



(b) Warpage deformation of the camera cover predicted by Moldflow

图 9 Abaqus 和 Moldflow 软件对相机盖翘曲变形预测的对比

Fig. 9 Comparison of warpage deformation prediction for camera covers using Abaqus and Moldflow software

归因于高斯积分点映射策略对 C_{ijkl} 各向异性特征的完整保留, 其主分量 C_{iiii} 的局部相对误差控制在 3.8% 以内, 显著优于传统节点映射方法(误差 15%~22%)^[21]。

2.2 夹子组件的工艺-性能关联分析

进一步以长玻纤增强 PP 夹子组件(纤维含量 40%)为工程案例, 评估映射算法在复杂几何中的适用性。如图 10 所示, AMI 六面体网格成功捕获熔接线区域的纤维断裂特征(FLD 从初始 $L/D=60$ 降至 $L/D=28$), 导致该区域拉伸弹性模量衰减 42%。

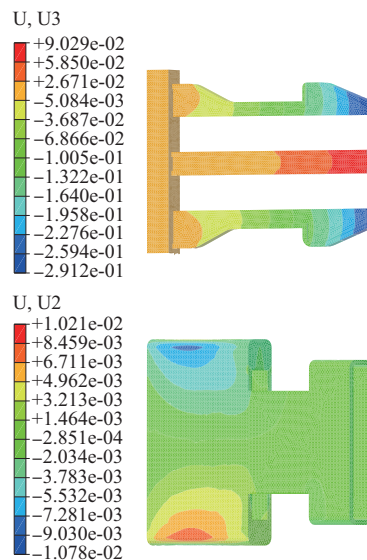


图 10 AMI 中单独建模以供流体和纤维分析的夹子组件

Fig. 10 Clip assembly modeled separately in AMI for fluid and fiber analysis

通过动态链接库将残余应力场映射至 Autodesk Simulation Mechanical 后, 应力分析结果如图 11 所示, 表层 S_1 高纤维取向区的 Von Mises 应力峰值达 58 MPa, 与试验 DIC 测量值 62 MPa 偏差 6.5%; 熔接线区域因纤维断裂与基体弱结合, 应力集中系数降低至 1.1, 与疲劳试验断裂位置相符。上述分析结果表明, 工艺诱导的各向异性场通过守恒

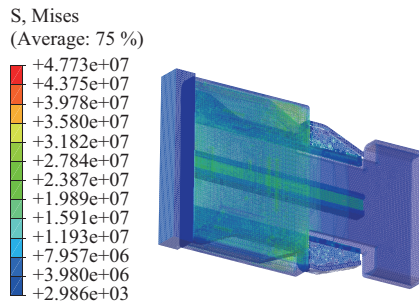


图 11 AMI 映射数据后的夹子组件应力分析

Fig. 11 Stress analysis of clip assembly after data mapping in AMI

映射可准确驱动结构性能预测,其误差主要是因为FLD的跨尺度简化假设造成的,下一步的研究可以通过耦合离散纤维断裂模型进一步优化^[22]。

3 结论

提出了一种基于高斯积分点拓扑的跨尺度数据守恒映射方法,有效解决了注射成型多场耦合仿真中各向异性场变量(如纤维取向、残余应力)在异构网格间的无损传递难题。通过ARBF构建非线性映射关系,实现了 C_{ijkl} , α_{ij} , σ_{ij} 的高精度传递,关键性能指标如下。

(1)精度提升:刚度张量主分量传递误差仅2.8%,同时保持纤维取向张量(α_{ij})的对称性与特征值收敛性;在玻纤增强PA6相机盖案例中,翘曲变形预测与AMI仿真结果的相关系数达0.96,最大位移误差仅2.2%。

(2)工程验证:长玻纤PP夹子组件的熔接线区域模量衰减效应(42%)被准确捕捉,应力峰值预测误差控制在6.5%以内;该方法支持工艺-结构多尺度耦合仿真,为纤维断裂演化和半结晶材料各向异性疲劳评估提供理论框架。

(3)工业兼容性:通过DLL与主流CAE软件(如Abaqus, Ansys)集成,实现每秒 10^5 量级积分点的实时传输,显著提升设计迭代效率。

未来方向将拓展至流致振动、湿热老化等多物理场耦合场景,并探索机器学习驱动的自适应映射优化,以进一步提升计算效能。

参考文献

- [1] 马志国. 注塑成型与制品结构行为联合仿真理论和实验验证[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
MA Zhiguo. Co-simulation theory and experimental verification of injection molding and product structural behavior[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [2] FOLGAR F, TUCKER C L. Orientation behavior of fibers in concentrated suspensions[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1984, 3(2):98-119.
- [3] THOMAS A J, BAROCIO E, BILIONIS I, et al. Bayesian inference of fiber orientation and polymer properties in short fiber-reinforced polymer composites[J]. Composites Science and Technology, 2022, 228. DOI:10.1016/j.compscitech.2022.109630.
- [4] PAPATHANASIOU T D, BÉNARD A. Flow-induced alignment in composite materials[M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2021.
- [5] 管涛, 李元庆, 郭方亮, 等. 基于纤维取向分布图像处理技术的短纤维增强聚合物基复合材料力学性能预测方法[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9):4 826-4 836.
- GUAN Tao, LI Yuanqing, GUO Fangliang, et al. A method for predicting the mechanical properties of short fiber reinforced polymer composites based on fiber orientation distribution image processing technique[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9):4 826-4 836.
- [6] 王金荣. 基于模腔压力的微注塑制品质量表征方法研究[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2020.
WANG Jinrong. Quality characterization method of micro-injection molded products based on cavity pressure[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2020.
- [7] WANG K H, CHEN Y T, HWANG S J, et al. Influence of back pressure and geometry on microstructure of injection-molded long-glass-fiber-reinforced polypropylene ribbed plates[J]. Polymer Testing, 2022, 116. DOI:10.1016/j.polymertesting.2022.107797.
- [8] LI Z, WANG B, HAO P, et al. Multi-scale numerical calculations for the interphase mechanical properties of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Composites Science and Technology, 2025, 260. DOI:10.1016/j.compscitech.2024.110982.
- [9] MA Z G, SHI X Z, HAN Y L, et al. Co-simulation technology of mold flow and structure for injection molding reinforced thermoplastic composite (FRT) parts[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5(2):960-972.
- [10] CHO Y S, JEON B, MIN J, et al. A multi-scale approach for finite element method structural analysis of injection-molded parts of short fiber-reinforced polymer composite materials[J]. Applied Sciences, 2025, 15(13). DOI:10.3390/app15137434.
- [11] LIN K, WANG Z L. Multiscale mechanics and molecular dynamics simulations of the durability of fiber-reinforced polymer composites[J]. Communications Materials, 2023, 4. DOI:10.1038/s43246-023-00391-2.
- [12] WANG J, O'GARA J F, TUCKER C L III. An objective model for slow orientation kinetics in concentrated fiber suspensions: Theory and rheological evidence[J]. Journal of Rheology, 2008, 52(5):1 179-1 200.
- [13] 吴鹏. 汽车全塑前端框架结构及注塑过程工艺参数优化研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2020.
WU Peng. Research on structure and injection molding process parameters optimization of automotive all-plastic front-end frame [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2020.
- [14] 李西顺, 杨明华, 孙正峰. 车用塑料件的模流与结构联合仿真分析[J]. 计算机辅助工程, 2017, 26(5):17-22.
LI Xishun, YANG Minghua, SUN Zhengfeng. Co-simulation analysis of mold-flow and structure for automotive plastic parts [J]. Computer Aided Engineering, 2017, 26(5):17-22.
- [15] 姜旭, 解鹏, 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.
- [16] 徐照兴. 一种基于接口编程的高效通用数据访问层的设计与实现[J]. 河北水利电力学院学报, 2021, 31(2):72–76.
XU Zhaoxing. Design and implementation of an efficient universal data access layer based on interface programming[J]. Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, 2021, 31(2):72–76.
- [17] 聂昕, 雷发桂, 朱国华, 等. 基于参数映射的玻纤增强PMH结构数值方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6):129–137.
NIE Xin, LEI Fagui, ZHU Guohua, et al. Numerical methods of glass fiber reinforced PMH structure based on parameter mapping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6):129–137.
- [18] 朱涵睿, 顾轶卓, 孟庆宇, 等. 注塑成型长玻纤/尼龙复合材料车轮纤维分布规律研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(11):50–57.
ZHU Hanrui, GU Yizhuo, MENG Qingyu, et al. Study on fiber distribution in injection-molded LGF/PA composite wheel[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(11):50–57.
- [19] 鲍泉. 长玻纤增强聚丙烯注射发泡压缩成型的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
BAO Quan. Research on injection foaming compression molding of long glass fiber reinforced polypropylene[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [20] 季予望. 基于张量计算的时序数据分析与网络压缩研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
JI Yuwang. Research on time series data analysis and network compression based on tensor calculation[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [21] 李先阳. 复合材料液体成形工艺渗透率计算与流动仿真系统开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
LI Xianyang. Permeability calculation and flow simulation system development for composite material liquid molding process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [22] 喻九阳, 张天义, 刘博文, 等. 短切玻璃纤维复合材料有限元模拟及其随机分布快速生成算法[J]. 塑料科技, 2025, 53(3):121–128.
YU Jiuyang, ZHANG Tianyi, LIU Bowen, et al. Finite element simulation of short-chopped glass fiber composites and a fast generation algorithm for their random distribution[J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(3):121–128.

(上接第130页)

- [9] 张佳燕, 刘博文, 王玉忠, 等. 聚氨酯泡沫无卤阻燃研究进展[J]. 高分子学报, 2022, 53(7):842–855.
ZHANG Jiayan, LIU Bowen, WANG Yuzhong, et al. Recent advances in halogen-free flame-retardant polyurethane foams[J]. Acta Polymerica Sinica, 2022, 53(7):842–855.
- [10] SUBBA RAO T, BERA S. Protective layer dissolution by chlorine and corrosion of aluminum brass condenser tubes of a nuclear power plant[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 123. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105307.
- [11] ZATKALÍKOVÁ V, UHRÍČIK M, MARKOVICOVÁ L, et al. Corrosion Behavior of Sensitized AISI 304 Stainless Steel in Acid Chloride Solution[J]. Materials, 2022, 15:1–11.
- [12] 王浩臻. 基于分子筛载水发泡聚氨酯硬泡材料缓释机理及相关特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2025.
WANG Haozhen. Study on slow-release mechanism and related characteristics of water-borne polyurethane rigid foam based on molecular sieve[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2025.
- [13] REIGNIER J, ALCOUFFE P, MÉCHIN F, et al. The morphology of rigid polyurethane foam matrix and its evolution with time during foaming – New insight by cryogenic scanning electron microscopy[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 552:153–165.
- [14] 陈振, 张增志, 丛中卉, 等. 开孔型聚合物发泡材料的研究及应用进展[J]. 材料工程, 2020, 48(3):1–9.
CHEN Zhen, ZHANG Zengzhi, CONG Zhonghui, et al. Research and application progress of open-cell polymeric foams[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(3):1–9.
- [15] 张振雨, 邵长磊, 沈光耀, 等. 国和一号自主化新燃料运输容器试验设计与验证[C]//压力容器先进技术——第十届全国压力容器学术会议论文集(下). 杭州, 2021:548–555.
ZHANG Zhenyu, SHAO Changlei, SHEN Guangyao, et al. Experimental design and validation of new fuel transport containers for hualong one[C]. Advanced Pressure Vessel Technology-Proceedings of the Tenth National Pressure Vessel Academic Conference (Volume II). Hang Zhou, 2021:548–555.
- [16] CUI Z, HAN J W, SUN J, et al. Preparation of aliphatic bio-based polyester polyols for water-blown and halogen-free flame retardant rigid polyurethane foam[J]. Polymer Degradation and Stability, 2024, 226. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2024.110832.
- [17] SHUAI M K, GONG Y, CHENG F, et al. Innovation in lifetime prediction of rigid polyurethane foam through random vibration and comparison with conventional methods[J]. Polymer Testing, 2023, 125. DOI:10.1016/j.polymertesting.2023.108122.