

宽幅橡胶片材挤出机头流场分区温度控制研究

王韬¹, 焦冬梅^{2*}

(1. 新艺林市政园林集团有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 青岛科技大学, 山东 青岛 266000)

摘要: 针对宽幅橡胶片材挤出过程中流动不均和厚度偏差问题, 建立非等温流场数值模型, 对挤出机头内温度场分布特征及分区温度调控对挤出均匀性的影响进行了研究。结果表明, 沿挤出方向各截面厚度方向温差逐渐减小, 有利于提高出口片材的成形稳定性; 一区温度主要影响熔体的流动能力, 而二区温度对出口挤出速度及其均匀性具有显著影响。合理提高压缩区和定型段温度, 可有效降低出口速度标准差, 改善挤出均匀性。

关键词: 温度场; 挤出均匀性; 分区控温; 宽幅机头

引用论文: 王韬, 焦冬梅. 宽幅橡胶片材挤出机头流场分区温度控制研究 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(5):38-44.

中图分类号: TQ320.663

文章编号: 1009-797X(2026)05-0038-07

文献标识码: B

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.05.009

0 前言

宽幅橡胶片材广泛应用于密封、减振及防护等领域, 其尺寸厚度均匀性直接影响产品的使用性能^[1-2]。在宽幅片材挤出过程中, 由于机头结构复杂、幅宽较大且常采用单侧进料方式, 熔体在机头内沿宽度方向的流动阻力分布不均, 易导致出口挤出速度差异, 从而引发片材厚度不均等质量问题, 导致性能不稳定, 造成安全隐患。

已有研究表明, 通过优化机头结构或调控温度场分布可在一定程度上改善熔体流动平衡, 提高产品均匀性^[3]。然而, 针对宽幅橡胶片材挤出机头中分区温度调控与挤出均匀性之间的耦合关系, 仍缺乏系统的数值分析。

因此, 本文以某宽幅橡胶片材挤出机头为研究对象, 建立三维流场数值模型, 分析机头内温度场分布特征, 并重点研究分区冷却条件下一区温度与二区温度对熔体流动平衡及挤出均匀性^[4]的影响规律, 为宽幅机头温控优化提供理论依据。

1 流体模型建立与评价方法

1.1 流体模型

本文研究对象为宽幅片材挤出过程^[5], 其制品毛坯宽度为 1 400 mm, 厚度为 3 mm。挤出机头内部流

场模型如图 1 所示, 整体流场由主流道流场和小流道流场两部分构成。胶料由主流道入口进入流场后, 通过小流道沿主流道垂直方向依次经过阻尼区、压缩区和定型段, 最终挤出形成片材。

为便于流场分析, 将主流道入口截面中心设定为几何模型的坐标原点。其中, Y 轴正方向定义为胶料的挤出方向, Z 轴正方向定义为胶料的填充方向。胶料进入流道后, 在沿 Z 方向逐渐充满主流道截面的同时, 沿 Y 方向发生挤出流动。

为改善由于单侧进胶形式产生的流动不均现象, 本文在机头结构中引入如图 2 所示的阻尼块结构。阻尼块截面呈梯形, 其上底宽度 w 为 5 mm, 高度 h 为 3 mm。阻尼块沿机头宽度方向布置, 其高度沿 Z 方向逐渐减小, 并在机头末端与小流道底部齐平。

1.2 评价指标与网格无关性验证

挤出片材的厚度均匀性是评价制品质量的重要指标之一。由于片材厚度分布与机头出口处胶料流速分布密切相关, 本文采用出口截面速度标准差作为挤出速度均匀性的评价指标, 其计算公式如 (1) 所示:

作者简介: 王韬 (1985-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事建筑工程与电力工程的传热分析, 工程装备与工程结构优化方面的研究。

* 为通讯作者

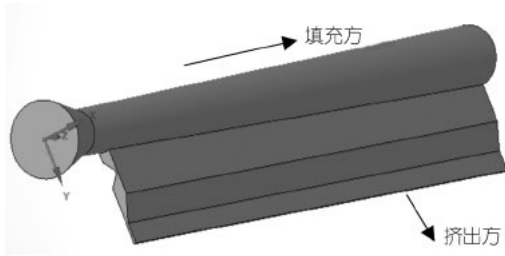


图1 机头流道几何模型

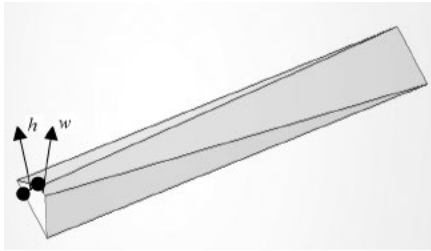


图2 阻尼块

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(v_i - \bar{v}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

式中， v_i 为出口截面中间层第 i 个统计节点的速度值， \bar{v}_i 为对应节点速度的平均值， n 为统计节点总数。

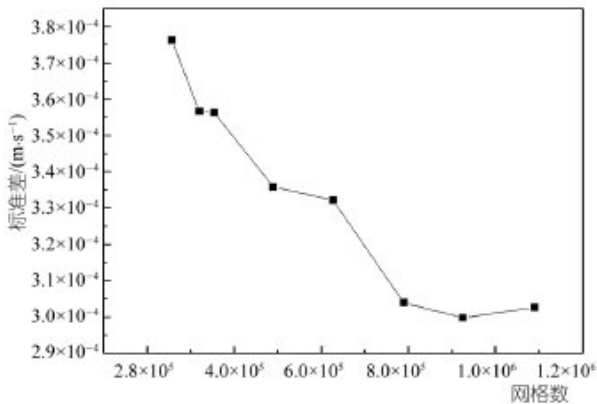


图3 网格数量对出口速度标准差的影响

为验证数值计算结果对网格划分的敏感性，本文对不同网格数量条件下的出口速度标准差进行了对比分析，其结果如图3所示。随着网格数量由80万增加至109万，出口速度标准差稳定在约 3×10^{-4} 的范围内，变化幅度较小，表明计算结果对网格数量的依赖性较弱，数值结果已基本收敛。综合考虑计算精度与效率，后续模拟分析中选取80万网格作为计算网格数量。

2 数学模型与边界条件

本文采用非等温 Carreau 本构模型，方程为：

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + t^2)^{\frac{n-1}{2}} \exp \left| \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right| \quad (2)$$

E_0 为熔体的黏流活化能， $J \cdot (\text{kg} \cdot \text{mol})$ ； R_0 为气体摩尔常数， $J / (\text{mol} \cdot \text{K})$ ； T_0 为参考温度， K ； η_{∞} 为无穷剪切黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ， η_0 为零剪切黏度为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； λ 为松弛时间； n 为非牛顿指数；

本研究中挤出物料为三元乙丙橡胶 (EPDM 3280)，模型所采用的边界条件设定如下：进料口处物料压力为 19.6 MPa，出料口处物料相对压力为 0 MPa，进料口温度为 393 K；壁面边界采用无滑移条件，壁面流速为 0，同时在冷却系统作用下，壁面温度保持为 343 K。

在挤出过程中，宽幅挤出机头内部的热传递属于三维非稳态导热问题^[6-7]，且忽略内热源的影响。其固体导热过程满足相应的导热微分方程，如式(3)所示。结合宽幅挤出机头的实际工况，其定解条件分别由式(4)和式(5)确定。

$$\frac{\sigma^2 T}{\sigma x^2} + \frac{\sigma^2 T}{\sigma y^2} + \frac{\sigma^2 T}{\sigma z^2} = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\sigma T}{\sigma t} \quad (3)$$

式中： ρ —材料的密度， kg/m^3 ；

c_p —热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

λ —热导率， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

第一类边界条件： $T_w = T_w(x, y, z, t)$ (4)

式中： T_w —边界温度， $^\circ\text{C}$ ；

x, y, z —直角坐标；

t —时间， s 。

第三类边界条件： $-k \frac{\sigma T}{\sigma x} = h(T_s - T_f)$ (5)

3 温度场分布特性分析

沿胶料挤出方向取6个截面，如图4所示，分析胶料每个截面中间层的温度状态。

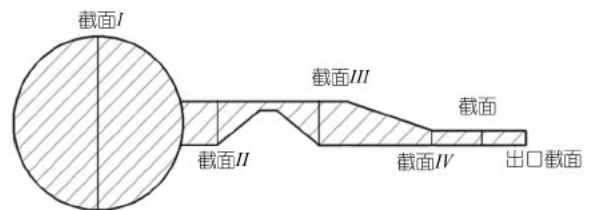


图4 截面选取

由图5可知，胶料在机头内由入口向出口流动过程中，各截面温度呈逐渐降低的趋势，出口处胶料温度约为 360 K。各截面温度分布均以中间层为对称轴呈对称分布特征，其中中间层温度最高，靠近壁面区域温度较低，根源在于壁面冷却作用。

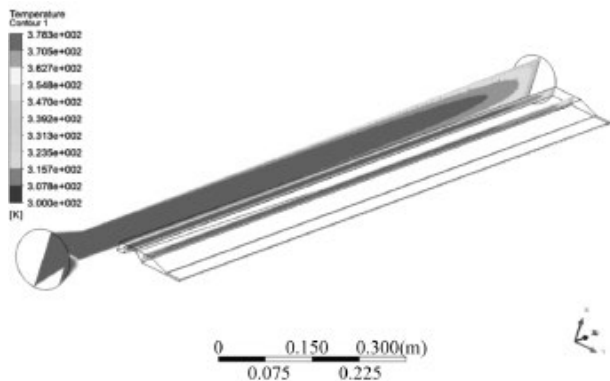


图5 各截面温度分布

图6所示为不同截面中间层沿机头宽度方向的温度梯度分布。可以看出,主流道截面I的温度梯度明显大于其他截面,这是由于主流道与小流道内胶料流动方向及流速差异所引起的。相比之下,阻尼区、压缩区及定型段截面的温度分布趋势基本一致,表明流场在进入小流道后趋于稳定。

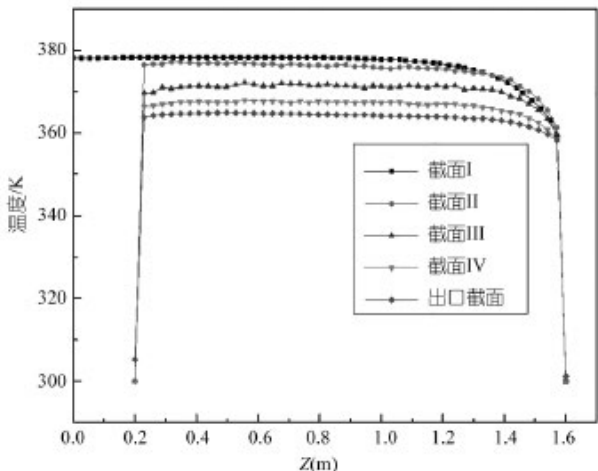


图6 截面中间层沿Z方向的温度梯度

沿厚度方向的温度分布如图7所示。结果表明,沿挤出方向,各截面内部与表层之间的温差逐渐减小,出口截面厚度方向温差约为9.38 K。温差的减小有利于降低热应力集中,为实现片材挤出过程中的厚度均匀性提供了有利条件。

4 分区域并联冷却对挤出均匀性的影响

主流道和阻尼区温度定义为一区温度,记为 T_f ;压缩区和定型段温度定义为二区温度,记为 T_b ,在保持其他结构参数及物性参数不变的条件下,分别研究一区和二区温度变化对机头内熔体流动特性及挤出均匀性的影响。

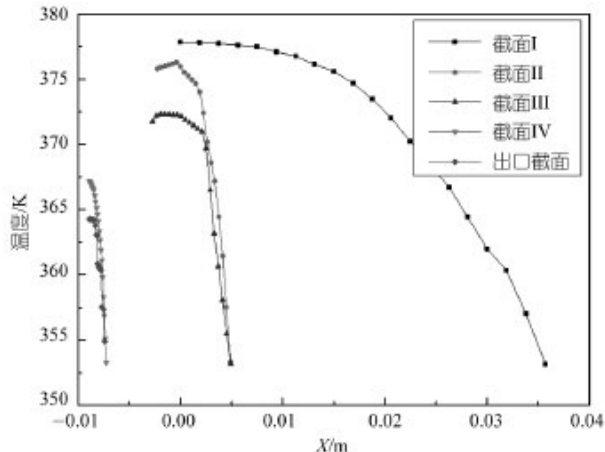


图7 各截面沿x方向的温度梯度

4.1 一区温度 T_f 的影响

4.1.1 压力分布特征

图8(a)~(d)为不同一区温度条件下各截面中间层节点的压力分布。结果表明,随着一区温度 T_f 的升高,各截面沿机头宽度方向的压力分布趋势基本一致,但压力最大值与最小值之差逐渐减小。这表明,一区壁面温度升高提高了胶料流动性,起到降低熔体流动阻力的作用,使压力损失减小,从而改善流场内的压力分布不均现象。

4.1.2 挤出速度及均匀性分析

由图9和图10可知,随着一区温度 T_f 的升高,各截面的挤出速度提高,而出口截面挤出速度标准差逐渐减小,挤出均匀性得到改善。例如,当 T_f 由80℃提高至110℃时,出口截面中间层挤出速度均值由0.0085 m/s增加至0.0103 m/s。

结果表明,一区温度对熔体流动能力及挤出产量具有显著影响,但考虑到橡胶的成型工艺要求,一区温度需控制在合理范围内,过高温度会对材料性能产生不利影响,引起焦化,不利于后续流动。

4.2 二区温度 T_b 的影响

4.2.1 压力分布特征

由图11可知,改变二区温度 T_b 对主流道截面I及阻尼区截面III的压力分布影响较小,而对压缩区截面IV及出口截面V的压力分布影响较为显著。随着 T_b 的升高,压缩区和出口截面沿宽度方向的压力整体增大,有利于熔体填充和流动。

4.2.2 挤出速度及均匀性分析

图12和图13表明,二区温度 T_b 的变化对阻尼区截面速度影响不明显,但对压缩区、定型段及出口截

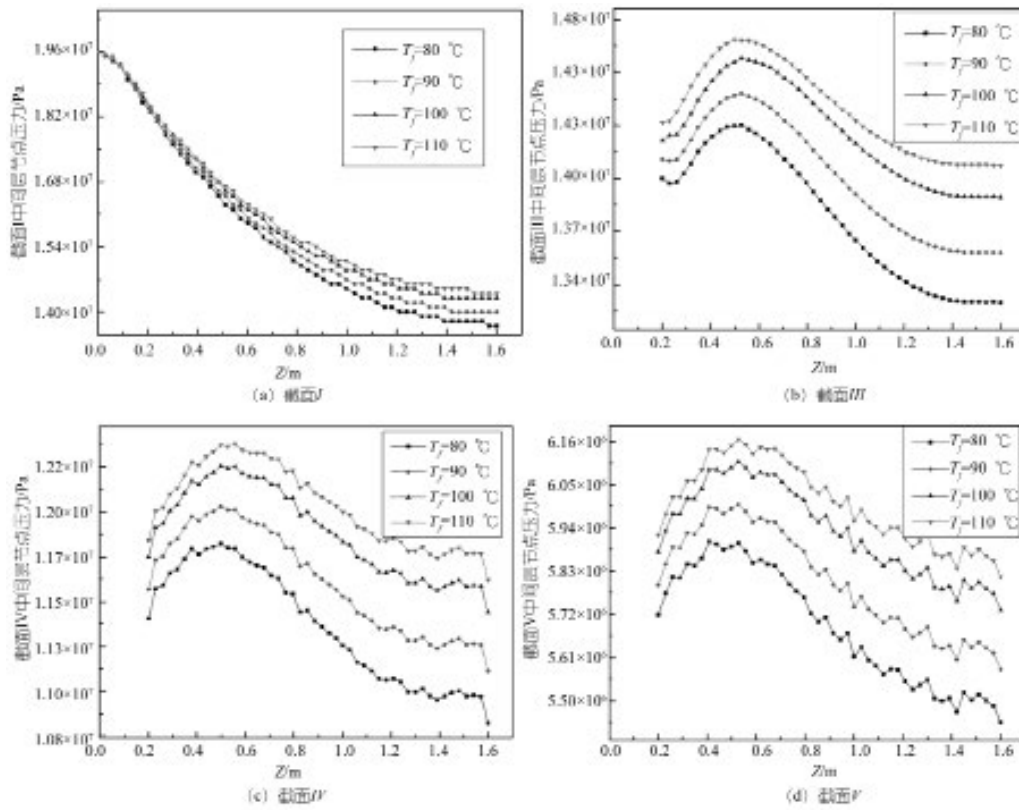


图8 各截面中间层节点压力分布

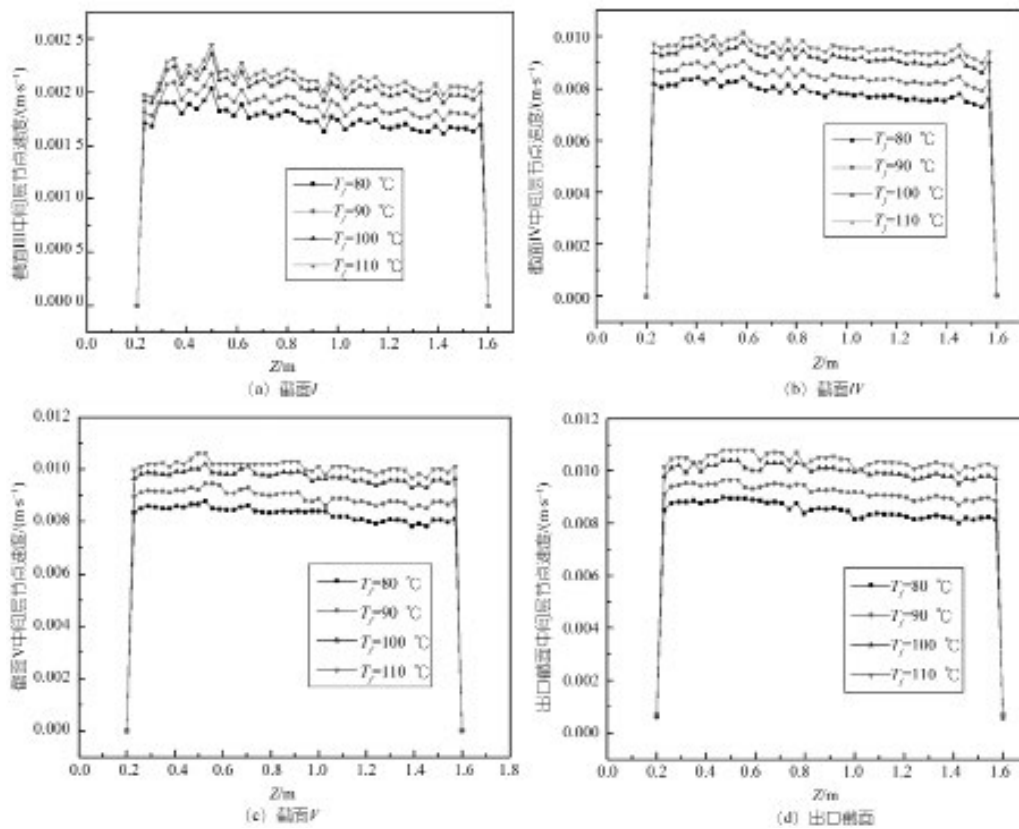


图9 各截面中间层节点的挤出速度

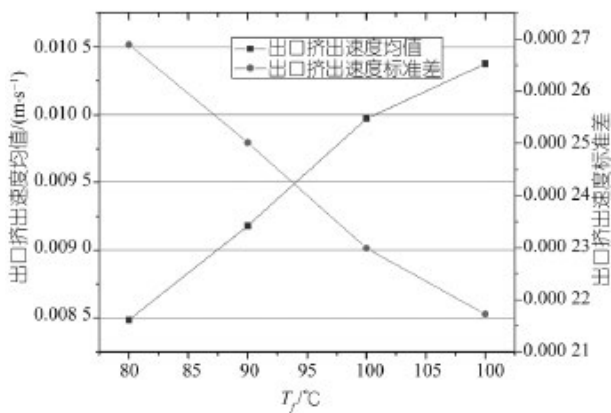


图 10 一区温度不同时出口截面挤出速度

面的挤出速度具有显著影响。随着 T_b 的升高，出口截面挤出速度均值明显增加，同时挤出速度标准差逐渐减小，挤出均匀性显著改善。

例如，当 T_b 由 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 提高至 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 时，出口截面中间层挤出速度提高约 17%，挤出速度标准差由 0.275×10^{-3} 降低至 0.261×10^{-3} 。结果表明，合理提高压缩区与定型段温度是改善宽幅片材挤出均匀性和提高生产效率的关键因素。

5 结论

(1) 宽幅片材挤出过程中，机头内胶料温度沿挤

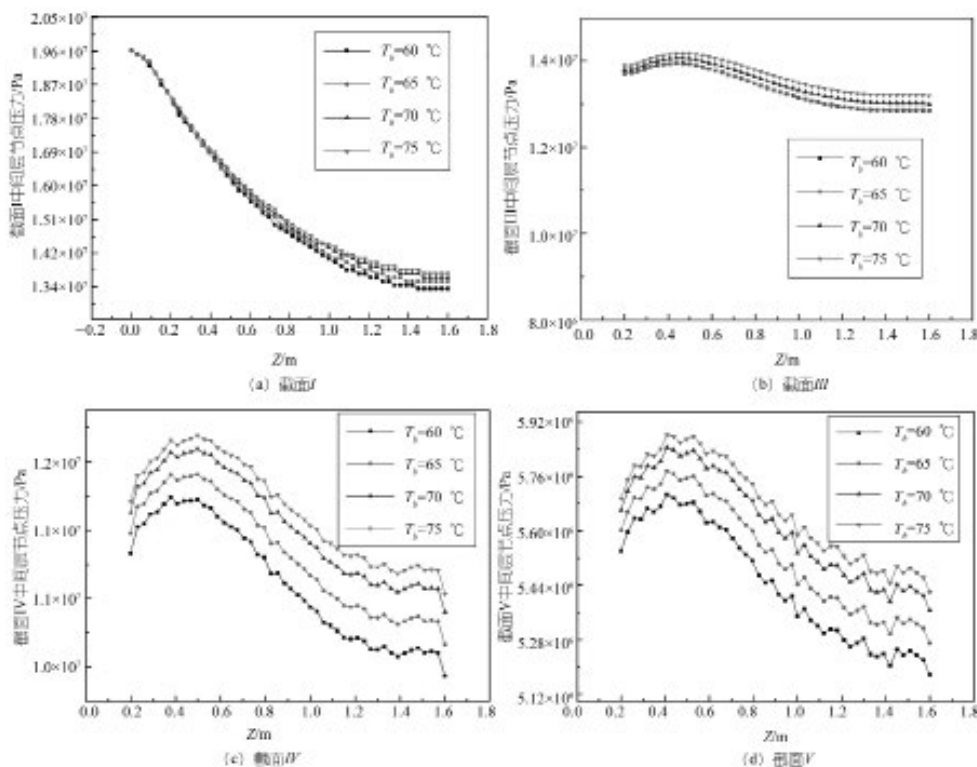


图 11 各截面中间层节点压力分布

出方向逐渐下降，各截面温度以中间层为对称轴呈对称分布特征，壁面冷却作用导致表层温度低于内部区域。

(2) 随着胶料由入口向出口流动，各截面厚度方向温差逐渐减小，有利于降低出口片材内部热应力集中，为实现挤出均匀性提供了基础条件。

(3) 分区域温度调控可有效改善机头内熔体流动平衡。其中，一温区温度主要影响熔体流动能力和压力分布；二温区温度对出口挤出速度及其均匀性具有决定性作用。

(4) 合理提高压缩区和定型段温度可显著提高挤出速度并降低出口速度标准差，从而改善宽幅橡胶片材的挤出均匀性，为宽幅机头温控优化提供理论依据。

参考文献：

- [1] 陈岳. 2019 年中国建筑防水行业发展现状分析 [J]. 中国建筑防水, 2020(02):1-3.
- [2] 两端进料式宽幅片材挤出机头流道流场分析橡胶工业 [J]. 2009,56 (01):49-54.
- [3] Razeghiyadaki A, Wei D, Perveen A, et al. Effects of melt temperature and non-isothermal flow in design of coat hanger dies based on flow network of non-Newtonian

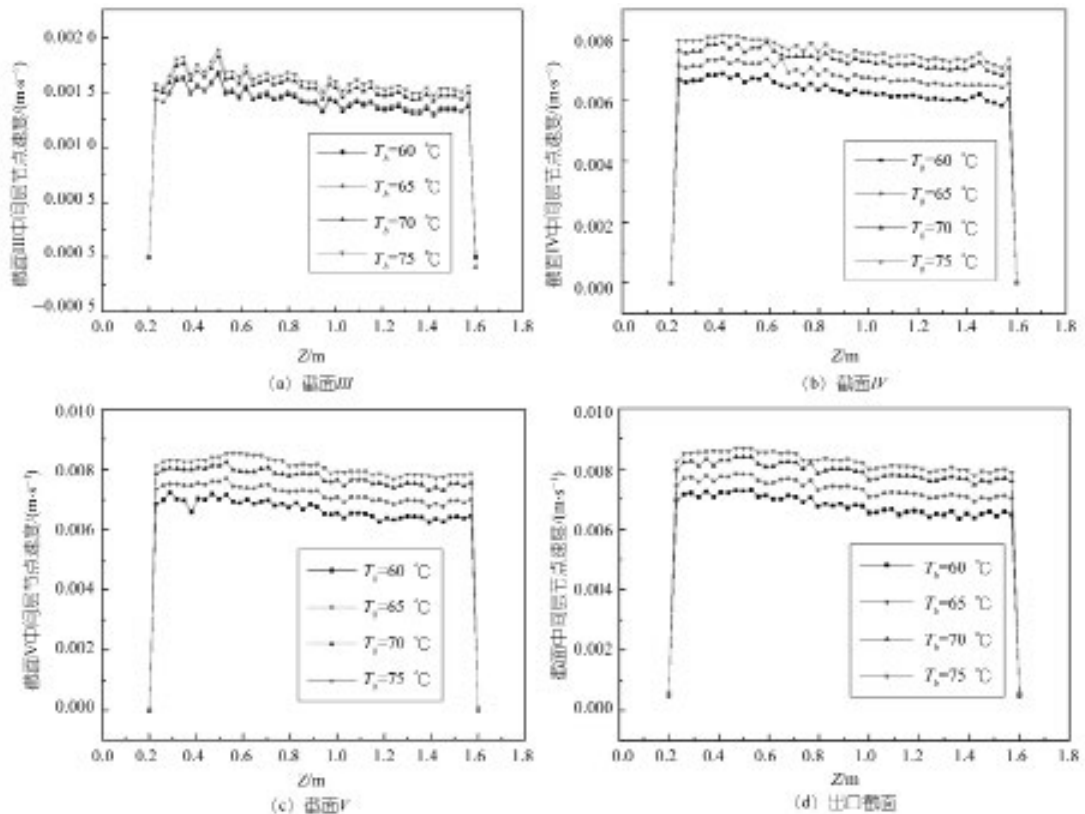


图 12 各截面中间层节点的挤出速度

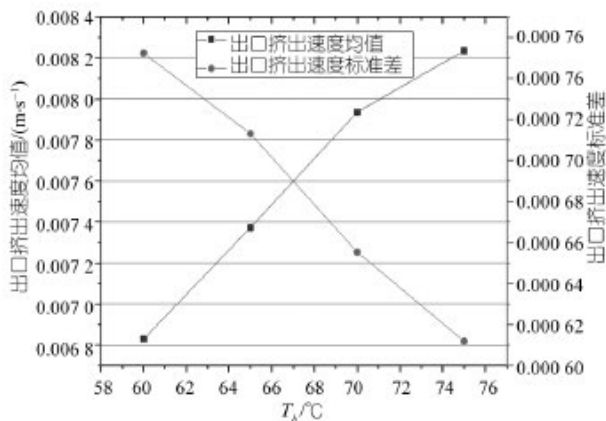


图 13 二区温度不同时出口截面挤出速度

fluids[J]. *Polymers*, 2022, 14(15):3 161.

- [4] 李冬燕. 宽幅挤出流场稳定性研究及优化 [D]. 青岛科技大学, 2021.
- [5] 郭超, 焦冬梅. 响应面法优化 L 型宽幅挤出机头流场的研究 [J]. *北京化工大学学报 (自然科学版)*, 2023, 50 (02):105-111.
- [6] 王瑞华. 三元乙丙橡胶耐热空气老化性能与高温场高弹本构模型适用性的研究 [D]. 青岛科技大学, 2019.
- [7] Zhang Y, Zhang X, Yang M, et al. Experimental validation of two constitutive models for numerical simulation on the extrusion of rubber blends. *Polymer Engineering & Science*, 2023, 63(11): 3 865-3 878.

Research on temperature control in flow field partitions of wide rubber sheet extrusion die

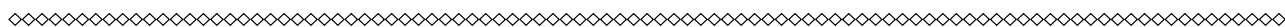
Wang Tao¹, Jiao Dongmei^{2*}

- (1. Xinyilin Municipal Landscape Group Co. LTD., Qingdao 266000, Shandong, China;
2. Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266000, Shandong, China)

Abstract: Addressing the issues of uneven flow and thickness deviation in the extrusion process of wide rubber sheets, this paper investigates the distribution characteristics of the temperature field within the extruder head and the impact of temperature regulation in different zones on extrusion uniformity by constructing a numerical model of a non-isothermal flow field. The results indicate that along the extrusion direction, the temperature difference in the thickness direction of each cross-section gradually decreases, which contributes to enhancing the molding stability of the exit sheet. The temperature in Zone 1 primarily affects the flowability of the melt, while the temperature in Zone 2 significantly influences the exit extrusion speed and its uniformity. Reasonably increasing the temperature in the compression zone and the shaping section can effectively reduce the standard deviation of the exit speed and improve extrusion uniformity.

Key words: temperature field; extrusion uniformity; temperature control by zones; wide-width die

(R-03)



全球十家轮胎巨头联手，碳管理正重塑轮胎产业

10 global tire giants join forces, and carbon management is reshaping the tire industry

近日，轮胎行业项目（TIP）与 UL Environment 联合发布第四版轮胎产品类别规则（PCR）。这不是一次普通的标准修订——它背后站着的是全球轮胎行业最核心的力量：十大顶级轮胎巨头首次联手，共同为全行业划定了从原材料到报废回收的全生命周期碳足迹“统一标尺”。

十家巨头牵头，统一碳管理核心标尺

作为世界可持续发展工商理事会（WBCSD）旗下核心行业组织，TIP 由普利司通、米其林、大陆、固特异、倍耐力等全球 10 家头部轮胎企业 CEO 牵头，此次发布的第四版 PCR 是对原有规则的全面迭代，有效期长达五年。作为轮胎全生命周期评估（LCA）、环境产品声明（EPD）编制的标准化指南，新版 PCR 首次实现了碳管理维度的全面升级，为全球轮胎行业构建了统一、透明、可对比的环境信息披露框架。

新版 PCR 技术升级：碳管理更精准、更本地化

除了“巨头联手”这一产业组织层面的亮点，新版 PCR 在技术内容上也实现了显著升级：

- （1）生物碳核算方法完善：针对天然橡胶等生物基材料的碳足迹计算更加科学，避免模糊处理。
- （2）全品类覆盖：从乘用车胎、卡客车胎扩展到越野轮胎、特种轮胎。
- （3）本地化数据引入：纳入轮胎报废管理、车辆能效、区域电网结构、实际载重等参数，使评估更贴近真实场景。
- （4）对标欧盟 EF 3.1 框架：环境影响指标体系与欧盟最新环境足迹标准保持一致，为出口合规铺路。
- （5）更新数据库与排放因子：提升数据质量，降低核算误差。

UL Solutions 深度参与，确保规则独立透明

作为全球最权威的第三方安全与可持续标准机构之一，UL Solutions 全程参与了新版 PCR 的制定与发布，其权威背书进一步保障了 PCR 的专业性与全球适用性。值得关注的是，新版 PCR 明确鼓励全行业自愿执行，旨在通过统一的碳管理标准，推动轮胎产业从“被动减排”向“主动绿色升级”转型。

碳管理已成为全球产业发展的核心共识，此次十家全球轮胎巨头联合发布新版 PCR 规则，不仅是行业对“双碳”目标的积极响应，更是轮胎产业升级的重要信号。未来，随着碳管理标准的持续完善与落地，轮胎企业将在绿色转型中实现高质量发展，全球轮胎产业也将迈入低碳、高效、可持续的全新发展阶段。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)