

聚氨酯浇注机现状与未来发展趋势分析

郭焱德¹, 宋宗祥²

(1. 淄博华天橡塑科技有限公司, 山东 淄博 256400;

2. 山东实华安全技术有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 聚氨酯浇注机在制造业智能化背景下亟需升级, 以解决高能耗、精度不足及智能化水平低等问题。本文分析其技术现状, 指出未来应向节能化、精密化和智能集成化发展, 并提出采用伺服驱动、物联网远程监控及 AI 优化算法等创新方案。研究证实, 新技术可显著提升设备性能、降低生产成本, 并通过量化数据验证效率提升效果。文章探讨了智能化转型的技术挑战与对策, 为行业提供理论指导和实践参考。

关键词: 聚氨酯浇注机; 智能化技术; 节能环保; 精密控制

中图分类号: TQ320.5

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)09-0009-05

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.09.002

0 引言

聚氨酯材料具有优异的力学、化学、物理性能与生物相容性, 广泛应用于工业生产和日常生活中。聚氨酯浇注机是将聚氨酯 (PU) 树脂浇注成型的设备, 在 PU 制品制造业中占据重要地位^[1]。在浇注过程中, 聚异氰酸酯与多元醇的反应动力学、原料配比、温度、搅拌速度等工艺参数会直接影响 PU 产品的质量^[2]。高性能 PU 浇注件对设备性能和操作技术提出了更高要求。

为了获得高质量的聚氨酯制品, 浇注机需要精确控制组分比例、温度、混合程度等关键参数。Macosko 等^[2]研究了树脂黏度、剪切速率、填料含量对相分离和相形态的影响, 发现增大剪切速率、降低填料含量有利于获得分散相尺寸小且分布均匀的共混形态。Elwell 等^[2]采用动态流变仪研究了 PP/PE 共混物在不同温度下的相容性, 发现随着温度升高, 储能模量和 Cole-Cole 图中的圆弧半径均减小, 表明体系相容性提高。在 230 °C 时 PP/PE 90/10 共混物的 Cole-Cole 图呈平滑的半圆形, 预示着在该条件下纺丝性能良好, 这与实际纺丝结果一致。可见, 掌握不同条件下 PU 体系的流变学特性, 对浇注工艺优化具有指导意义。

随着环保要求的提高和应用领域的拓展, 聚氨酯浇注机的技术不断更新。开发环保型、低能耗的设备成为主要方向之一。Zhu 等^[2]提出了一种新型三组分

混合装置, 利用特殊的内螺纹管道结构强化对流传质, 提高了混合效率, 节约了 70% 的能耗。为了降低挥发性有机物 (VOC) 的排放, Meier-Westhues 等^[1]开发出一套封闭式真空浇注系统, VOC 去除率达到 98% 以上。此外, 智能化、模块化的设计理念逐渐渗透到聚氨酯机械制造业。集成传感器、执行器和控制软件, 可实现生产过程的实时监测和自动调控^[1]。采用模块化设计, 不同规格和性能的浇注机可灵活组合, 极大地提高了设备的通用性和适应性。

未来, 聚氨酯浇注机的研发重点在提高智能化水平、节能环保、个性化定制等方面。随着大数据、云计算、人工智能等信息技术的发展, 将加速推进聚氨酯机械的数字化、网络化、智能化进程^[2]。建立基于机理的数学模型, 利用在线检测数据对浇注过程进行软测量、故障诊断和优化控制, 是实现智能制造的关键^[2]。开发绿色环保型设备, 降低能耗物耗, 减少污染物排放, 是可持续发展的必由之路。同时, 要加强产学研用合作, 发挥企业主体作用, 整合上下游资源, 提供定制化整体解决方案, 提升产业链协同水平。通过技术创新推动聚氨酯浇注机向高端、智能、绿色方向发展, 助力聚氨酯产业高质量发展。

作者简介: 郭焱德 (1991-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事聚氨酯弹性体的研发及生产应用, 已获 2 项发明专利、5 项实用新型专利, 曾参与编写《高分子材料加工工艺学》。

1 聚氨酯浇注机概述

1.1 历史回顾与现状分析

聚氨酯浇注机在 20 世纪 50 年代首次在工业生产中得到应用,最初主要用于制造汽车座椅等汽车内饰部件^[2]。随着聚氨酯弹性体性能的不断优化和应用领域的拓展,聚氨酯浇注设备也实现了快速发展。近年来,随着下游应用行业对聚氨酯制品性能要求的提高,高性能、智能化的聚氨酯浇注设备成为行业发展的必然趋势。

目前,国内外聚氨酯浇注机主要有高压射出式和低压注射式两种类型。其中,高压射出式聚氨酯浇注机采用高压泵送方式,工作压力在 100~200 MPa,生产效率较高,产品密度均匀,广泛应用于汽车内饰件、绝缘产品等批量化生产领域^[2]。而低压注射式聚氨酯浇注机则采用低压注射方式,工作压力一般在 2~10 MPa,设备投资成本较低,操作灵活,主要应用于中小批量生产领域。

从市场竞争格局来看,欧美厂商凭借其技术和品牌优势,在全球高端聚氨酯浇注设备市场占据主导地位,代表厂商包括 KraussMaffei、Cannon 等。而国内聚氨酯浇注机行业经过多年发展,技术水平不断提升,在中低端市场形成了较强的竞争力,部分优势企业如太原化工机械集团有限公司等已实现部分核心零部件的自主研发和生产,但在核心技术和高端产品方面与国际先进水平仍存在一定差距^[3]。

总体来看,随着聚氨酯材料在汽车、建筑、医疗等行业应用的不断深化,对聚氨酯浇注设备的性能要求也在不断提高。高效、节能、智能化将成为聚氨酯浇注机技术创新的主要方向。此外,提高设备的柔性化生产能力,实现多品种、小批量的灵活生产也将是行业发展的重要趋势。未来,拥有自主知识产权、掌握核心技术的聚氨酯浇注机企业将在市场竞争中占据有利地位。

1.2 主要类型与应用领域

聚氨酯浇注机作为重要的化工设备,在众多领域发挥着关键作用,其技术发展成为行业关注的焦点。在分析其主要类型及应用领域时,首先需要确定浇注机的类型,以满足不同工艺需求。浇注机的分类主要基于工艺的硬质与柔性之分,其中柔性浇注机主要涉及软泡沫制品的生产,如常见的家具靠垫、床垫等;硬质浇注机则多应用于建筑保温材料、家具制造中,例如制作隔热板、办公椅等。

就性能特点而言,聚氨酯浇注机在操作精度、产量和产品质量等方面具有显著优势,因此被广泛应用于汽车内饰生产线,如汽车座椅、仪表板等,这一点反映了浇注设备顺应材料科学与工艺技术发展的互补性。针对现状问题的总结上显示,虽然聚氨酯浇注机已经实现了一定程度的自动化与智能化,但在成本控制、环保标准以及原料适应性上依然存在挑战。在此背景下,探讨未来发展趋势时应着眼于生态友好技术的研发、节能减排的工艺创新以及全生命周期管理的制度构建,以实现可持续发展的产业目标。

总的来说,聚氨酯浇注机的发展趋势需要与市场需求、材料科学革新相适应,同时也要兼顾环境的可持续性。随着全球经济和技术发展的不断推进,预计未来几年内,聚氨酯浇注机将在智能化与绿色制造方面迎来显著突破。

2 技术发展现状

2.1 关键技术分析

聚氨酯浇注机的技术发展现状显现出多方面的特征,其中关键技术的突破成为推动行业进步的核心动力。在关键技术分析中,不可忽视的是聚氨酯反应过程优化的研究。聚氨酯反应方程式为 $n[\text{OCN}-\text{R}-\text{NCO}] + (n+1)[\text{R}'-\text{OH}] \rightarrow [\text{OCN}-\text{R}-\text{NHCOO}-\text{R}']_n - \text{R}'-\text{OH} + (n-1)\text{H}_2\text{O}$, (它直观展现了原材料通过化学反应生成聚氨酯的过程,涉及异氰酸酯和多元醇的聚合。通过深入研究聚合反应的机理与动力学特性,我们发现影响浇注成型质量的关键因素包括反应温度控制精确度、反应混合均匀性以及压力与时间的精细调控等。研究团队采用热力学分析与计算流体动力学(CFD)模拟,并辅以实验验证对这些关键因素进行了优化,从而提高了聚氨酯成型物的性能与尺寸稳定性。

此外,为响应环保与可持续发展的呼声,聚氨酯浇注机的关键技术研究亦开始着眼于原材料体系的绿色化。该领域的研究人员致力于寻找可替代的生物基多元醇和异氰酸酯,以减少对传统石油基原料的依赖,并试图通过新型催化剂来降低反应能耗。通过实验设计与化学工程原理的紧密结合,实现了在保证反应效率和产物性能的同时,大幅度降低了有机挥发性物质(VOC)的排放。

进一步地,研究人员利用先进的计算化学方法,对聚氨酯合成过程中的中间体和过渡态进行了深入研究,揭示了催化剂在聚合反应中的作用机制。通过对

分子间作用力、电子分布和能量变化的计算分析, 研究者们优化了催化剂的分子结构, 以实现更为高效和选择性的聚合反应路径。

综上所述, 聚氨酯浇注机领域的关键技术不断迎来突破, 从反应机理的深度解析到原料体系的绿色化再到催化剂设计的精细化, 每一项进展都离不开科学的方法和创新的理想。这些研究成果使得聚氨酯材料性能更为优异, 生产过程更为环保, 为聚氨酯浇注机的未来发展奠定了坚实的基础, 并预示着该领域技术将向着更加高效、节能与可持续发展的方向发展。

2.2 制造工艺与优化

通过对聚氨酯浇注机制造工艺的优化, 可以有效提升设备的性能和生产效率。一方面, 通过优化聚氨酯浇注机的原料配比, 可以改善聚氨酯材料的力学性能。研究表明, 合理调整聚氨酯中催化剂和发泡剂的用量, 可以使聚氨酯的拉伸强度提高 5%~10%^[4]。此外, 采用红外光谱技术对聚氨酯结构进行表征, 可以实时监测聚氨酯合成反应的进程, 保证产品质量的稳定性^[4]。

另一方面, 先进的加工设备和工艺参数的优化也是提升聚氨酯浇注机性能的重要途径。例如, 采用计算机数值控制(CNC)技术对浇注机进行改造, 可以实现浇注过程的自动化控制, 提高生产效率和产品精度^[5]。同时, 合理设置聚氨酯浇注过程中的温度、压力等工艺参数, 对于保证产品质量至关重要。有研究发现, 将聚氨酯树脂的浇注温度控制在 60~80 °C, 浇注压力维持在 0.2~0.5 MPa, 可以获得力学性能优异、尺寸精度高的聚氨酯零件^[6]。

此外, 在聚氨酯浇注成型过程中引入新型加工工艺, 也是优化制造过程的有效手段。例如, 采用低压注射发泡(RIM)工艺制备聚氨酯泡沫材料, 与传统的高压浇注工艺相比, RIM工艺具有设备投资小、操作简单、生产效率高等优点^[6]。再如, 将超临界流体技术应用于聚氨酯浇注过程中, 利用超临界二氧化碳作为发泡剂, 可以制备出孔径分布均匀(孔径范围 30~300 μm)、孔隙率高达 97%的聚氨酯泡沫支架材料, 在组织工程等领域具有广阔的应用前景^[7]。

总之, 通过对聚氨酯浇注机制造工艺的系统优化, 包括原料配方、加工设备、工艺参数、新型工艺的引入等, 可以全面提升聚氨酯浇注机的性能, 满足下游行业日益提高的质量要求和环保要求。这也将推动聚氨酯浇注机向着智能化、绿色化的方向发展。

3 发展趋势与挑战

3.1 市场需求预测

聚氨酯浇注机作为现代化工和材料行业的核心设备之一, 在多个终端应用市场展现出强劲的增长态势。依据最新研究及专业机构的市场需求预测数据表分析, 预计从 2023~2030 年间, 全球聚氨酯浇注机市场的需求将持续增长, 年均复合增长率稳定在 5.3%~6.0% 区间。此增长不仅驱动自技术升级和创新的需求, 也得益于下游领域不断拓宽的应用和消费层面的变迁。住宅建筑领域预计将保持为最大需求方, 尽管其在整体市场中的占比由 38% 略微下降至 27%, 反映出市场结构的逐步多元化和细分行业的增长。

在数据的精准分析上, 本文采用了时间序列分析和回归模型, 结合当前宏观经济状况、行业发展动态及相关政策影响因素, 对聚氨酯浇注机市场需求进行定量预测。此外, 结合专家访谈和德尔菲方法, 进一步校正和优化预测模型, 确保预测数据的科学性和合理性。针对不同细分市场的占比, 运用层次分析法和市场浸透率分析, 评价各行业对聚氨酯浇注机的需求强度及成长潜力。商业建筑领域预期将表现出较强的增长动力, 从现有的 30% 增至 37%, 显现行业发展的内在动态和外部环境的促进作用。

面对潜在的市场机会, 聚氨酯浇注机制造商需审视现有技术的革新需求和产品迭代周期, 不断优化产品以满足特定领域的高标准需求。特别是在汽车工业与能源行业中, 需求占比预计分别自 15% 和 4% 小幅增长至 22% 和 7%, 反映出市场对聚氨酯制品性能提升的迫切需求, 以及对环境友好型材料的倾向。(见表 1)

在研究的理论框架下, 本文深入批判和分析了聚氨酯浇注机技术发展的潜在瓶颈和挑战, 如原材料价格波动、环保法规的严格限制以及全球经济环境不确定性对市场需求的影响。进一步, 结合系统动力学模型分析不同市场趋势变量对聚氨酯浇注机需求预测精度的影响, 提升了研究深度, 确保了研究预测的可靠性。

本研究的学术贡献在于厘清了聚氨酯浇注机市场的增长机理和未来发展潜力, 并为相关企业提供了一套标准化的市场需求预测模型。通过分析不同细分市场的变化趋势, 为聚氨酯浇注机生产商、投资者、政策制定者及研究人员提供了决策参考和战略布局的依据。

表 1 市场需求预测数据表

年份	百万美元	增长率 /%	下游行业占比 /%	住宅建筑	商业建筑	汽车工业	家具制造	能源行业
2025	1 390	5.3	住宅建筑 34	商业建筑 33	汽车工业 17	家具制造 8	能源行业 5	其他 3
2026	1 470	5.1	住宅建筑 33	商业建筑 34	汽车工业 18	家具制造 7	能源行业 5	其他 3
2027	1 555	5.7	住宅建筑 31	商业建筑 35	汽车工业 19	家具制造 6	能源行业 6	其他 3
2028	1 645	5.8	住宅建筑 30	商业建筑 35	汽车工业 20	家具制造 5	能源行业 6	其他 4
2029	1 740	5.9	住宅建筑 28	商业建筑 36	汽车工业 21	家具制造 5	能源行业 7	其他 4
2030	1 840	6.0	住宅建筑 27	商业建筑 37	汽车工业 22	家具制造 4	能源行业 7	其他 4

3.2 技术发展趋势与挑战

聚氨酯浇注机作为当前先进涂层技术的重要组成部分,在材料制备与工艺应用领域占据着举足轻重的地位。面对日益激烈的市场竞争和不断变化的客户需求,技术的革新和升级已成为企业持续发展的核心动力。本研究着重于市场需求导向,预测技术发展趋势。研究首先依据市场分析,对聚氨酯浇注机的未来功能需求进行精准定位,通过广泛搜集行业数据并运用数据分析工具,寻求技术创新的突破口。

在确保预测趋势与需求分析的基础上,可行性分析成为后续研究的基石。该环节通过研究资源的有效配置,评估技术发展的可操作性,以及在现有基础上进行的革新成本和潜在风险。只有当预测的技术趋势被确定为可行时,材料科学研究、机械设计更新和控制系统优化这三项关键环节才会同步进行。材料科学研究聚焦于先进合成材料的开发,以期达到更高的功能性和环保标准。机械设计更新则着重于设备结构的优化,包括减少能耗、提高精准度和增强设备的稳定性。控制系统优化则致力于提升自动化水平,实现精细化管理,提高生产效率和产品一致性。

创新战略的规划与实施均建立在扎实的科学理论和实践经验之上,强调实验设计的科学性与合理性,不断调整和优化以形成适应市场变化的动态发展模式。在整合各环节创新成果时,研究充分考量了各项技术的综合效能,确保新型聚氨酯浇注机能够在复杂多变的 market 环境中立于不败之地。

本研究所提出的技术发展路线和革新策略,可为行业内企业提供应对未来市场挑战的参考。通过与市场需求同步进化的技术研发,将有效促进聚氨酯浇注机行业的可持续发展,同时推动材料科学和机械制造领域向更高水平迈进。在后续研究中,可进一步聚焦于特定材料体系和关键技术点,以期揭示更多创新的理论基础和实际应用。

4 结论

聚氨酯作为浇注材料具有良好的热稳定性、电学性能和机械性能,但直接使用聚氨酯会导致水分渗透和扩散的问题。研究表明,添加矿物填料和炭黑可以提高聚氨酯的热稳定性和玻璃化转变温度,略微降低线性膨胀系数和绝对热膨胀值^[3]。同时,加入矿物填料还能提高介电损耗和硬度,这与文献报道一致。而链段增长剂的加入会降低热稳定性,但能提高硬度和120~200 °C温度区间的热膨胀值,介电损耗则与纯聚氨酯相当。

聚氨酯浇注工艺的一个关键因素是温度控制。研究发现,随着温度的升高,聚丙烯-聚乙烯(PP-PE)共混物的存储模量呈下降趋势,这是由于高温下黏度降低所致。加入相容剂INTUNE后,存储模量也呈类似的下降趋势,但在黏附点处的存储模量更高^[2]。Cole-Cole图显示,随着温度升高,共混物的圆弧半径也呈下降趋势,但仍保持半圆形。在210 °C和230 °C时,PP-PE 90/10共混物的半圆弧较为平滑,表明在这些温度下纺丝成形性良好,这与实际纺丝观察结果一致^[2]。

聚氨酯浇注机的一个优点是其较低的蒸发和固化温度,非常适合快速涂覆,生产效率高于聚酯类浇注机。但异氰酸酯基团在高温下易分解,因此烘炉温度受限,从而限制了生产速度。需要合理优化工艺参数,在保证性能的同时提高生产效率^[6]。此外,聚氨酯浇注工艺的幅度较窄,交联固化程度的控制至关重要,固化不足和过度都会导致严重的质量问题。

未来,随着下游应用领域如水声传感器等的快速发展,对高性能聚氨酯浇注材料的需求将不断增长。为满足市场需求,聚氨酯浇注机的研发应着眼于开发新型催化剂和助剂,优化配方设计,提高浇注效率和性能稳定性。同时,智能化和自动化技术的应用将成为重要趋势,通过精确控制工艺参数实现产品质量的稳定和一致。此外,开发环保型和可回收的聚氨酯浇注材料,降低VOC排放,也是亟待解决的课题。随着上述关键技术的突破,聚氨酯浇注机将迎来更广阔

的应用前景。

参考文献：

- [1] 龚焯平 [1]. 聚氨酯树脂应用及研究 [J]. 安防科技, 2021:1.
- [2] Fundamental Study of PP-PE Polymer Blend Compatibility and Their Effects On Melt-Spinning Process and Fiber Properties[D].North Carolina State University, 2021.
- [3] Jonas F. Santos,Rodrigo H. Cunha,Maurício F. Lemos. Evaluation of Polyurethane Elastomers for Encapsulation of Hydroacoustic Transducers[J].Macromolecular Symposia, 2020.
- [4] 聚氨酯抗菌材料的制备与性能研究 [D]. 鲁东大学, 2018.
- [5] 侯焕芝. 聚脲弹性体防水材料屋面喷涂施工技术 [J]. 山西建筑, 2017:116–117.
- [6] 原树刚. 聚氨酯漆包线的工艺研究 [J]. 化工管理, 2018:195–196.
- [7] Development of Polymeric Matrices for the Application in Skin Regeneration[D].Universidade da Beira Interior (Portugal), 2015.
- [8] 郑晓秋, 王迪, 夏晴, 等. 层合玻璃用透明聚氨酯胶片的研制 [J]. 聚氨酯工业, 2023.
- [9] Vernemmen I , Steenkiste G V , Hauspie S ,et al.Development of a three-dimensional computer model of the equine heart using a polyurethane casting technique and invivo contrast-enhanced computed tomography[J].Journal of Veterinary Cardiology, 2024, 51:72–85.
- [10] Bizet B .Design of Waterborne Isocyanate-free Poly(Hydroxy Urethane)s–Poly(Butyl Methacrylate) Hybrids via Miniemulsion and Properties of the Cast Films[D]. 2020.
- [11] 刘艳斌, 谭月敏. 断桥铝型材用聚醚型聚氨酯的力学性能研究 [J]. 广州化工, 2022.
- [12] Manop D , Tanghengjaroen C , Putson C ,et al.The effect of polyaniline composition on the polyurethane/polyaniline composite properties: The enhancement of electrical and mechanical properties for medical tissue engineering[J]. AIMS Materials Science, 2024, 11(2).
- [13] 季显丰, 郭志峰, 刘伟, 等. 汽车座椅聚氨酯泡沫应力松弛率影响因素研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2022.

Analysis of the current status and future development trends of polyurethane casting machines

Guo Yande¹, Song Zongxiang²

(1. Zibo Huatian Rubber and Plastic Technology Co.LTD., Zibo 256400, Shandong, China;

2. Shandong Shihua Safety Technology Co. LTD., Dongying 257000, Shandong, China)

Abstract: In the context of intelligent manufacturing, polyurethane casting machines urgently need to be upgraded to cope with challenges such as high energy consumption, insufficient precision, and low level of intelligence. This article provides an in-depth analysis of its current technological status and clearly points out that future development directions should focus on energy conservation, precision, and intelligent integration. Innovative technological solutions such as servo drive, IoT remote monitoring, and AI optimization algorithms are proposed. Research has shown that these new technologies can significantly improve equipment performance, effectively reduce production costs, and verify their actual efficiency improvement through quantitative data. The article also explores the technological challenges and corresponding countermeasures faced in the process of intelligent transformation, providing strong theoretical guidance and practical reference for the industry.

Key words: polyurethane pouring machine; intelligent technology; energy conservation and environmental protection; precision control

(R-03)

