气体辅助注塑技术（AI–GAIM）科学发展的分析研究（上）

张友根
（上海第一塑料机械厂，上海　201201）

摘要：针对传统气体辅助注塑（GAIM）存在气体路径控制精度不足、制品尺寸与表面质量难以稳定保障的问题，开展了人工智能 — 气体辅助注塑集成技术（AI–GAIM）的科学发展研究。从系统框架、成型全流程 AI 优化策略、智能模具设计、控制系统迭代、物联网大数据融合、废气清洁化处理等维度梳理技术体系，分析碳纤维、热固性塑料、弹性体、微发泡等拓展成型工艺的关键技术与应用案例。研究表明，AI–GAIM 通过数据驱动实现了成型过程闭环智能调控，可提升制品质量与生产效率；该技术未来将推进装备、工艺、标准与绿色制造协同发展，为高分子材料智能成型提供技术参考。

关键词：人工智能；气体辅助注塑；智能模具；大数据；闭环控制
引用论文：张友根．气体辅助注塑技术（AI–GAIM）科学发展的分析研究 [J]. 橡塑技术与装备，2026, 52(11):01-09.
中图分类号：TQ320.66　　**文章编号**：1009-797X(2026)11-0001-09
文献标识码：B　　DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.11.001

0　前言

智能气体辅助注塑技术 (AI–GAIM) 是近年来为了克服传统注塑成型局限性而迅速发展起来的一种创新性的塑料加工成型技术，堪称塑料加工业的一次重大变革。AI 具有强大的数据处理和分析能力，可以快速处理大量的塑料成型过程数据，预测成型质量，优化工艺参数。GAIM 是一种新颖的塑料加工技术，可以在传统注射成型的基础上，通过注入气体来改善塑料产品的质量。人工智能（AI）融合气体辅助注射成型（GAIM）技术在塑料加工领域的应用越来越广泛。但在实际应用中仍存在诸多问题，如气体路径控制不精确、制品表面质量和尺寸精度难以保证等 [1]。因此，研究 AI-GAIM 科学发展成为了一个重要的研究课题，对于提升我国塑料加工及相关制造业的整体水平和国际竞争力具有重要的现实意义。

本文研究了人工智能（AI）和气体辅助注塑（AI–GAIM）融合集成可行性、AI–GAIM 注塑成型各阶段 AI 优化应用策略、AI–GAIM 模具 AI 优化科学发展、AI–GAIM 控制技术的科学发展、AI–GAIM 与物联网及大数据的融合科学发展、AI–GAIM 废气健康清洁化技术科学发展。本文最后研究了基于 AI–GAIM 成型技术科学发展的智能气体辅助碳纤维注塑、智能气体辅助热固性塑料注塑、智能气体辅助弹性体注塑、智能气体辅助微发泡注塑等注塑新技术。

1　人工智能（AI）和气体辅助注塑（AI–GAIM）融合集成可行性简析

AI–GAIM 指人工智能（AI）和气体辅助注塑（GAIM）两者融合集成。GAIM 其原理在于利用气体的可压缩性和对塑料熔体的排挤作用，改变熔融塑料在模具内的流动行为和压力分布，从而减少制品的残余应力、翘曲变形，提高制品的尺寸稳定性和外观质量。同时，AI 先进的控制算法及传感器技术的应用体现在对整个注塑过程中各种参数（如温度、压力、流量、时间等）的智能监测、分析、实时精确调控，使整个注塑过程更加精准、稳定和高效。AI 精确的工艺控制使得制品的尺寸稳定性得到显著提升，尺寸公差更小，能够满足对尺寸精度要求较高的产品生产需求，如电子精密零部件等。

1.1　融合的成型框架

将人工智能（AI）技术与气体辅助注塑成型（GAIM）工艺深度融合，构建一个智能化、高效化的注塑成型系统。由于涉及两个复杂领域的融合，其成型框架在模型构建、数据处理和系统集成等方面都具有较高的复杂性。例如，需要处理不同类型的数据（数

作者简介：张友根（1947–），男，教授级高级工程师，终身享受国务院政府特殊津贴，主要从事塑料材料和工艺的相关研究，已发表论文多篇。

值型、图像型等），以及协调 AI 模型与 GAIM 设备控制系统之间的通信和协同工作。

1.1.1 构建 AI-GAIM 模型

从数据层面出发，全面采集 GAIM 过程中的各类数据，包括工艺参数与成型制品质量数据。利用数据达成优化成型的目的，依据数据特点与注塑成型的复杂关系，挑选诸如神经网络等合适算法来构建能预测制品质量与工艺参数关联的模型。

设计 AI-GAIM 工艺优化与控制模块，使模型能依据实时数据预测并调整工艺参数。

为了有效管理数据、模型以及方便人机交互，分别规划出数据管理模块、AI 模型管理模块和人机交互界面模块，从数据存储查询、模型创建更新部署到操作人员的便捷使用等多方面完善框架功能。

从项目实施角度，按先后顺序规划需求分析与规划、硬件与软件选型、数据采集与模型构建、系统集成与测试以及上线与优化等步骤，确保框架能顺利落地应用并持续提升性能，实现对注塑成型过程的精准控制、优化以及质量提升。

1.1.2 功能模块

（1）数据管理模块

负责数据的存储、查询、更新与维护。建立数据库，存储历史工艺数据、模型训练数据以及实时采集的数据，方便数据的追溯与分析，为模型的优化与工艺改进提供数据支持。

（2）AI 模型管理模块

实现 AI 模型的创建、训练、评估、部署与更新功能。可以根据不同的塑料制品和工艺要求，选择合适的模型算法与结构，进行模型训练与优化，并将训练好的模型部署到生产环境中，实现与 GAIM 设备的无缝对接。同时，在生产过程中，根据新的数据反馈，定期对模型进行更新与迭代，以适应工艺变化和提高模型的准确性。

（3）工艺优化与控制模块

这是框架的核心模块，承担着根据 AI 模型预测结果进行 GAIM 工艺优化与实时控制的任务。接收来自数据采集系统的实时工艺参数数据，调用 AI 模型进行质量预测，然后依据预测结果与质量目标的差异，运用优化算法生成工艺参数调整指令，发送给 GAIM 设备的控制系统，实现对注塑成型过程的闭环控制，确保制品质量的稳定性和一致性。

（4）人机交互界面模块

提供友好的用户操作界面，便于操作人员与系统进行交互。操作人员可以通过界面设置工艺参数目标值、查看实时工艺数据与制品质量信息、监控系统运行状态、查看模型预测结果与历史数据报表等。同时，界面还提供报警功能，当系统检测到异常情况（如工艺参数超出正常范围、模型预测质量不合格等）时，及时向操作人员发出警报信息，以便采取相应的措施进行处理。

1.2 融合的理论框架

由于 AI 与 GAIM 分属不同学科领域，融合时必然涉及多领域知识交叉运用，在技术整合、人员协作等层面都会面临复杂挑战，由此构建起整个融合理论框架特点的描述思路。

1.2.1 系统集成理论

将气体辅助注塑系统与人工智能系统视为一个整体的智能制造系统。气体辅助注塑过程作为制造执行层，负责实际的生产操作；人工智能系统作为控制决策层，对注塑过程进行监测、分析和控制，二者通过数据交互和指令传递实现紧密集成，共同完成生产任务。

1.2.2 数据驱动理论

以气体辅助注塑过程中产生的大量数据为基础，如注塑参数、气体压力、温度、产品质量数据等，运用人工智能的数据挖掘、机器学习算法，从中提取有价值的信息和知识，建立数据模型，以实现对注塑过程的优化控制、质量预测和故障诊断等。

1.2.3 智能控制理论

借助人工智能的控制算法，如模糊控制、神经网络控制、强化学习等，根据气体辅助注塑的动态特性和控制要求，设计智能控制器，实现对注塑过程中气体注入量、注塑速度、保压压力等参数的实时精确控制，以提高生产效率、产品质量和稳定性。

1.3 融合的技术体系

1.3.1 数据采集与传输技术

在气体辅助注塑设备上安装各类传感器，如温度传感器、压力传感器、位移传感器等，实时采集注塑过程中的各种数据，并通过工业物联网技术将数据传输至 AI 平台系统，为后续的数据分析和处理提供数据支持。

1.3.2 数据分析与处理技术

运用数据挖掘、机器学习、深度学习等 AI 算法，对采集到的大量数据进行分析和处理，如建立注塑质

量预测模型、气体辅助注塑工艺参数优化模型、故障诊断模型等，以实现对注塑过程的智能化管理和控制。

1.3.3 系统集成与测试

将数据管理模块、AI 模型管理模块、工艺优化与控制模块以及人机交互界面模块进行集成，形成完整的融合集成注塑成型框架系统。在实验室环境或模拟生产线上进行系统测试，对系统的功能完整性、稳定性、可靠性以及性能指标进行全面测试，及时发现并解决存在的问题。

1.3.4 AI 智能控制技术

采用 AI 智能控制算法，如模糊逻辑控制、神经网络控制、模型预测控制等，根据数据分析的结果和预设的控制目标，自动调整气体辅助注塑设备的工艺参数，实现对注塑过程的闭环控制，提高生产过程的稳定性和产品质量的一致性 .

1.3.5 模拟与优化技术

利用计算机辅助工程（CAE）软件对气体辅助注塑过程进行模拟分析，结合 AI 算法对模拟结果进行优化，以获得最佳的注塑工艺方案和产品设计，减少试模次数和生产成本，缩短产品开发周期。

2 AI-GAIM 注塑成型各阶段融入 AI 优化策略

AI-GAIM 从模具设计到注塑过程的监控和优化，再到后期的质量控制和故障诊断，通过实时监测、动态调整、智能调度和预测性维护等策略，实现气体辅助注塑过程的全面智能优化。

气体辅助注塑（GAIM）成型过程更加复杂，像熔体预注射量、熔体 / 气体延迟时间、充注压力、熔体注射温度以及气道设计、注气点布局、气体保压时间等诸多工艺参数之间相互影响，工艺参数的设定对制品质量至关重要却又颇具难度。AI-GAIM 的出现为解决这一难题带来了曙光。AI 通过收集注塑过程中的大量实时数据，如温度、压力、速度等，运用算法进行分析，构建科学精准预测不同工艺参数对产品质量和生产效率影响的模型，迅速锁定最佳的工艺设定，大大缩短了前期准备时间，让生产能够更快地进入高效运行状态。

2.1 注射阶段融入 AI 优化策略

在注塑期这一关键阶段，AI 技术发挥着不可或缺的作用，摆脱传统依赖人工经验以及反复试验塑料注入量的方法，实现对塑料注入量的智能精准把控。AI 预测模内熔体流动状态实时优化注射参数。

利用机器学习算法，对塑料熔体在模具中的流动前沿进行实时预测。通过在模具中安装传感器，采集温度、压力等数据，AI 模型可以提前判断熔体的流动趋势，及时调整注射参数，使熔体能够更好地填充复杂形状的型腔，提高制品的成型质量 [2]。

AI 充分利用大数据分析，一方面对过往大量的注塑生产历史数据进行深度挖掘，从中梳理出不同产品类型、模具规格下塑料注入量与后续各阶段工艺匹配的规律；另一方面，实时监测注塑过程中的诸多关键参数，例如熔体的温度、粘度、流动速度，还有模具内部各个部位的压力情况等实时数据。通过将历史数据与实时监测数据相结合进行综合分析，AI 系统可以准确地计算出当前注塑产品所需的塑料注入量。

调整气体注入时间和压力。在 GAIM 注塑中，气体注入时间和压力的控制对制品的质量至关重要。AI 可以根据熔体的填充情况和模具内的压力变化，精确地确定气体注入的最佳时间和压力，使气体能够均匀地推动熔体填充型腔，减少制品的翘曲变形和表面缺陷。

AI 智能确定的熔融料和气体的注入量及注射参数既能充分满足后续充气阶段对塑料熔体状态的要求，保障气体能够顺利在塑料内部扩散并形成理想的中空结构，又能避免因注入塑料过量，致使在充气时气体冲破成品表面，造成产品外观瑕疵甚至直接报废的情况发生。

2.2 充气阶段融入 AI 优化策略

进入充气期后，AI 技术同样展现出强大的优势，对于保障充气过程顺利达到预期效果至关重要。

首先，在确定气体注入的时间节点方面，AI 会综合考量多方面因素。产品的设计要求是关键考量点之一，不同的产品结构、壁厚分布以及对中空部分的设计需求等，都决定了气体最佳的注入时间。例如对于一些壁厚较薄但内部需要较大中空空间的产品，就需要在熔体注射到特定位置、尚未完全冷却凝固时及时注入气体，以利用熔体此时较好的流动性来实现理想的中空效果；而对于壁厚相对均匀、结构较为规整的产品，注入时间又有所不同。同时，模具的状况也不容忽视，包括气道的布局、大小、走向以及与熔体流动方向的关系等，这些都会影响气体在模腔内的扩散路径和速度，AI 会根据这些模具特征来精确选择气体注入的最佳时刻。

其次，在控制气体注入的压力上，AI 更是发挥着核心作用。它可以实时收集注塑机在充气阶段的各项运行参数，像熔体当前的压力、温度，还有气体流量、流速等数据，同时结合之前积累的大量相似产品和模具配置下成功的注气压力案例，通过深度学习算法等进行智能分析，精准地设定出当前产品所需的气体注入压力。而且，AI 还具备图像识别等功能，能够实时监测充气过程中气体在模腔内的扩散情况，通过对模腔内熔体和气体状态图像的分析，判断气体是否按照预期使产品达到理想的中空状态。一旦发现气体扩散不均匀、有冲破熔体表面等异常情况，AI 系统可以迅速做出调整，及时修正气体注入压力等参数，保障充气过程的稳定和产品质量的可靠。

2.3 保压阶段融入 AI 优化策略

在气体保压期这个对产品最终质量有着重大影响的阶段，AI 技术通过先进的数据分析和智能算法，助力实现高质量的保压效果。

保压期内，产品内部已被气体填充，此时气体在成品中空部分形成的保压压力需要维持在一个合适的动态范围，才能最大程度减低成品的缩水及变形率。AI 技术运用深度学习算法等对收集到多维度数据进行全面且深入的分析，这些数据涵盖了从注塑开始到充气阶段积累的各种工艺参数，以及保压期内实时监测的气体压力、温度变化、熔体状态等信息。

通过对这些海量数据的分析处理，AI 可以实时掌握产品内部熔体的冷却收缩情况以及气体压力的变化趋势。基于此，它能够动态调整气体在成品中空部分的保压压力，当监测到某个部位由于熔体冷却收缩过快，有出现缩痕的风险时，AI 系统会及时指令增加相应区域的保压压力，确保气体能持续对熔体施加均匀的压力，填补因收缩产生的空隙；而当发现整体压力过高，可能对产品内部结构造成破坏或者影响脱模时，又会智能地适当降低保压压力。这种动态、精准的压力调整，能够有效避免因保压不当造成的产品外观缺陷、内部结构不稳定等问题，使得产品在保压结束后，不仅能保持良好的外形尺寸精度，还具备可靠的结构强度，为后续顺利脱模以及产品的高质量交付奠定坚实基础。

2.4 冷却阶段融入 AI 优化策略

AI 可以对模具的冷却水路通过模拟分析塑料熔体在冷却过程中的温度分布和热传递情况，结合制品的形状和尺寸，设计出最佳的冷却水路布局，提高冷却效率，缩短冷却时间，从而提高生产效率。

控制冷却时间。准确控制冷却时间是保证制品质量和生产效率的关键。AI 根据模具温度、制品厚度、材料热性能等因素，建立冷却时间的预测模型，精确地确定冷却时间的长短，使制品能够在合适的温度下脱模，避免因冷却时间不足或过长导致的制品变形、尺寸不稳定等问题。

平衡冷却效果。对于形状复杂或壁厚不均匀的制品，冷却不均匀会导致制品产生内应力和变形。AI 可以通过调整冷却水路的流量和温度分布，实现冷却效果的平衡，减少制品因冷却不均匀而产生的质量问题。

2.5 脱模阶段 AI 优化策略

脱模期作为气体辅助注塑的最后一个关键阶段，直接关系到成品能否完整且顺利地从模腔内取出，AI 技术在其中的应用极大地提高了脱模的成功率和产品的良品率。

AI 系统会对模具内多个关键数据进行实时监测与分析，其中气体压力是重要的一项参数。在冷却周期接近完成时，模具内气体压力的变化对于判断脱模时机起着关键作用，AI 通过高精度的压力传感器持续获取气体压力数值，并结合产品的具体结构、壁厚以及前期各阶段工艺参数等信息，准确判断出气体压力降至何种程度时，产品与模具之间的附着力最小，达到最佳的脱模状态。

同时，成品的冷却情况也是 AI 重点关注的因素。不同材质的塑料、不同的产品厚度以及模具的散热特性等，都会导致产品冷却速度和程度存在差异，而冷却不均匀或者未达到合适的脱模温度就强行脱模，极易造成产品变形、破裂等损坏情况。AI 借助分布在模具不同位置的温度传感器反馈的数据，运用智能算法分析整个产品的冷却均匀性以及是否已冷却到适宜脱模的温度范围。

2.6 成品质量检测阶段 AI 优化策略

缺陷检测与分类。利用计算机视觉和深度学习技术，对注塑制品的表面质量进行自动检测。AI 模型可以快速准确地识别出制品表面的缺陷，如气泡、划痕、缩水等，并对缺陷进行分类和评估，及时发现生产过程中的质量问题，提高产品的合格率。

尺寸测量与精度控制。通过光学测量设备和 AI 算法，对注塑制品的尺寸进行精确测量和分析。AI 模型可以自动判断制品的尺寸是否符合设计要求，并对尺寸偏差进行实时反馈和调整，确保制品的尺寸精度

满足客户的需求。

质量预测与预警。基于历史生产数据和实时监测数据，AI 可以建立质量预测模型，对未来生产的制品质量进行预测。当预测到制品质量可能出现问题时，及时发出预警信号，提醒操作人员采取相应的措施进行调整，从而有效地预防质量事故的发生。

拓展设备加工能力，实现设备资源节约型成型。气体辅助注塑可以降低锁模力，可使用小吨位的设备。相较于大吨位注塑机，小吨位注塑机的购置成本更低、能耗更小，而且设备的维护保养费用也相对较少。长期来看，设备运行过程中的能耗和维护成本也能得到有效控制。

3 AI−GAIM 模具 AI 优化科学发展的研究

通过人工智能（AI）技术提高注塑模具性能的设计优化，从而实现更高精度、更高效率和更高质量的制品生产。AI-GAIM 模具优化科学发展涵盖了多个方面，包括智能模具设计、实时监测与控制、动态刚度与锁模精度、故障诊断与预防、生产过程优化以及环境友好性。通过这些技术的应用，可以显著提高注塑模具的性能，从而实现高质量、高效率和环境友好的生产。通过机器学习模型预测模具设计的最佳方案，减少试错成本和时间。

3.1 AI-GAIM 模具技术设计关键点

利用 AI 算法优化模具设计，包括气体通道布局、冷却系统设计、刚度等，提高模具气体辅助注塑的动态性能。气体辅助注塑模具技术设计关键点：

3.1.1 注气洁净化

注气装置还配备了高效的气体过滤和净化系统，确保注入的气体纯净度高，不含杂质和水分等，防止这些杂质混入塑料熔体中影响制品的质量和性能。

3.1.2 注气智能化

注气的时机可以灵活调节，例如有的设备支持在塑料注射的不同阶段进行气体注入，比如可以选择在熔体刚进入型腔尚未完全充满时就开始注气的短射工艺，或者在塑胶熔体充满型腔之后再注气的满射工艺，通过这样灵活的注气时机选择，满足多样化的制品成型需求。

3.1.3 进气的气道结构优化

气道设计至关重要。气道的位置、大小和形状需依据塑件的形状、壁厚等因素精准确定，以保障气体能够均匀穿透塑料熔体，使塑件成型质量稳定。

气道结构和布局根据制品的形状、壁厚分布等因素进行合理设置，使得气体能够沿着预设的气道均匀地在模具型腔内扩散，从而推动碳纤维与塑料的混合物料填充到各个部位，避免出现气体聚集或者物料填充不足的情况。例如在制造具有复杂内部结构的汽车零部件模具时，气道会巧妙地绕过一些加强筋、卡扣等结构，保证气体能顺畅地到达每一处需要填充的空间。

气道的大小通常为壁厚的 2~4 倍，截面高度与宽度之比接近 1，这样能使气道外围塑料厚度均匀，防止因厚度差异较大导致冷却不均匀，进而产生内应力 [3]。

3.1.4 模具的排气结构优化

能够及时排出型腔内被气体置换出来的空气以及注塑过程中产生的一些挥发气体等，防止气体在型腔内积聚导致制品出现气孔、疏松等缺陷，确保制品的致密性和质量。而且，在模具的浇口设计上会考虑如何更好地配合气体辅助注塑，选择合适的浇口位置和形式，使塑料熔体在进入型腔初期就能与后续注入的气体有良好的协同作用，促进物料的均匀分布和流动。

3.1.5 模具浇口设计优化

配合气体辅助注塑高效化，选择合适的浇口位置和形式，使塑料熔体在进入型腔初期就能与后续注入的气体有良好的协同作用，促进物料的均匀分布和流动。

3.1.6 模具材质优化

模具材质选用了具有更高热导率、强度以及耐腐蚀性的材料。像一些高品质的模具钢，其热导率高，能够在注塑过程中更快速地传导热量，帮助塑料熔体快速冷却定型，缩短成型周期；同时强度高的材质可以承受气体辅助注塑时较高的压力，保证模具的使用寿命和尺寸精度。此外，对于一些需要加工特殊高性能碳纤维复合材料的模具，还会采用表面涂层等方式进一步提高模具表面的耐磨性、脱模性等性能，便于制品成型后顺利脱模，并且保持制品表面的光洁度，减少因脱模困难对制品外观和质量造成的不良影响。

3.1.7 模具表面处理

模具表面的光洁度和硬度对制品的外观和性能有重要影响。可以采用表面涂层、抛光等方法提高模具表面的光洁度和硬度，减少制品的表面缺陷和磨损。在 AI−GAIM 技术中，利用人工智能算法对模具表面处理方法进行优化选择。例如，根据制品的要求和材

料特性，自动选择最合适的表面处理方法，并调整处理工艺参数，以提高模具的表面质量和制品的质量稳定性。

3.2 模具与模板两者之间协同性研究

气体辅助注塑在生产复杂形状和大型薄壁制品时，模具绕度（即模具变形）和模板绕度（即模具模板的变形）之间的协同性直接影响到制品的质量和生产效率。以下是关于这两者协同性的详细讨论：

3.2.1 模具与模板两者之间刚度协同性研究

AI-GAIM 大面积薄壁制品，模具相比模板的惯性矩较小，所以模具和模板之间一体化连接的整体刚度主要取决于模板刚度，设计时确保模板刚度在任何工况下满足成型要求。

优化模具和模板之间一体化连接的整体刚度稳定性，以抵抗气体注入时产生的压力波动，保证设备在运行过程中的平稳性，减少因设备振动等因素对制品精度的影响。

3.2.2 刚度协同性设计原则

气体辅助注塑较多成型大面积薄壁制品，模具轴向厚度小于分型面宽度，模具刚度处于薄弱环节。模具与模板两者之间刚度设计中，根据成型及刚度功能的特征，提高模板刚度进而保证模具和模板两者的组合刚度，达到模具在高压注射情况下，仍保持模具动态刚度变化在许可范围内。

（1）模具材料及结构设计优化刚度

AI-GAIM 可以利用人工智能算法对模具结构进行优化设计，如选择高刚度高强度钢材或铝合金模具材料、增加模具支撑筋、优化模具材料等，提高模具的刚性和稳定性。

AI 根据制品的形状、尺寸和材料特性，自动设计最合适的模具结构，并对模具的冷却系统、浇口位置等结构进行优化调整，以提高制品成型的质量稳定性。

（2）模板结构设计优化刚度

通过有限元优化设计模板的结构，优化模板结构布局，确保应力均匀分布，提高模板整体刚度，降低模板挠度。

（3）模具刚度和拉杆刚度的协同性

如果拉杆刚度和模具刚度两者协同不佳，例如拉杆刚度不足导致合模不稳定，同时模具挠度又较大，那么在注塑过程中，模具型腔的尺寸和形状会不断变化，使得产品的尺寸精度、外观质量和内部结构都难以保证。当拉杆能够有效地抵抗变形，为模具提供稳定的合模力时，模具在注塑压力下的挠度可以得到合理控制，从而降低模具因过度变形而产生疲劳裂纹的风险，延长模具的使用寿命。

3.2.3 模具与模板两者之间动态性能协同性研究

如果锁模机构的动态性能不佳，可能导致注入过程中模具闭合发生变化，影响气体分布的均匀性和制品内部结构的稳定性。

（1）AI-GAIM 与锁模机构的动态稳定协同性

锁模机构的动态稳定性直接影响到注射过程中模具内部的应力分布。如果锁模部件不稳定，例如侧向力会导致模具分型面闭合发生变化，可能会导致制品局部应力集中，影响制品的内部结构和表面质量。

（2）锁模机构动态运行力学性能与控制指令协同性

AI 发出运行指令，锁模机构动力驱动必须与之协同。例如，在气体辅助注塑过程中，气体压力的突然增加可能使模具瞬间产生较大的挠度，而拉杆如果不能及时适应这种变化，就会破坏两者的协同性，影响制品质量。

总之，AI-GAIM 与锁模机构的动态性能协同性对注射质量有着重要影响。

3.3 AI-GAIM 注塑模具锁紧动态性能优化设计目标及目标函数的研究

在 AI 气体辅助注塑技术中，模具锁紧动态精度是一个关键因素，直接影响制品的质量和生产效率。利用 AI 技术优化模具锁紧机制，提高模具的动态刚度和锁模精度，减少制品变形和翘曲。 通过传感器监测模具的闭合状态，利用 AI 算法实时调整锁模力，确保稳定的锁模效果。为了实现高精度的锁紧，需要对锁模力、模具温度、气体压力和流量等多个变量进行优化。综合考虑锁模精度、动态刚度、温度控制、气体压力和流量控制、模具闭合稳定性等目标函数。提高制品尺寸和精度、表面质量、减少了翘曲和变形、生产效率、模具使用寿命。

以下是关于 AI 气体辅助注塑模具锁紧动态性能的多变量优化目标及目标函数的详细分析。

3.3.1 多变量优化目标

在气体辅助注塑过程中，涉及多个关键变量，这些变量需要协同优化以实现高精度的锁紧。主要的优化目标包括：

（1）锁模精度

提高锁模精度，确保制品的尺寸精度和表面质量。

（2）动态刚度

提高模具在动态过程中的刚度，减少变形。

（3）温度控制

精确控制模具温度，确保注塑过程中的稳定性和一致性。

（4）气体压力和流量控制

精确控制注入模腔气体压力和流量，确保气体辅助注塑过程的均匀性和稳定性。

（5）模具闭合稳定性

提高模具闭合的稳定性，减少锁模过程中的波动。

3.4 AI-GAIM 注塑模具技术发展案例

德国在 AI-GAIM 模具技术设计方面持续引领创新，通过先进的 AI 设计和制造技术，提高模具的精度、稳定性和使用寿命。以下是德国在气体辅助注塑模具方面的一些新技术和应用实例：

（1）AICAD 模具设计

德国企业，如克劳斯玛菲（KraussMaffei）和恩格尔（Engel），在模具设计阶段就采用了先进的计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助工程（CAE）工具。这些工具能够模拟气体流动和塑料填充过程，从而优化模具设计，确保制品的质量和一致性。

（2）快速冷却和加热技术

德国企业开发了先进的冷却通道设计，如螺旋形冷却通道，以及快速加热技术，以确保模具温度的均匀性和稳定性，显著缩短冷却时间，提高生产效率。

（3）智能模具管理系统

AI 模具管理系统能够实时监控模具的工作状态，通过传感器和数据采集系统收集信息，并通过 AI 算法进行分析，预测模具的磨损和维护需求。

自适应冷却系统。德国企业开发了自适应冷却系统，可以根据制品的具体要求自动智能调整冷却参数，以确保最佳的冷却效果和制品质量。

（4）智能传感器集成

智能传感器的集成实时监测模具的工作状态，提供精确的数据反馈，从而优化模具的设计和制造过程。

3.5 AI-GAIM 模具的未来发展潜力与挑战

AI-GAIM 模具技术有着极为广阔的发展前景。随着人工智能、大数据、物联网等先进技术的迅猛发展，AI-GAIM 模具将与之深度融合，实现智能化生产控制、预测性维护以及远程监控等功能，从而进一步提高生产效率和产品质量。

在新型模具设计方面，可能会出现更加灵活多变的气道结构设计，以满足日益复杂的塑件形状和性能要求。例如，研发出可自适应调整的气道系统，能够根据不同的熔体流动情况自动改变气道的大小和形状，进一步提高气体辅助注塑成型的效果。

4 AI-GAIM 控制技术的未来发展潜力与挑战

AI-GAIM 控制系统通过集成先进的传感器、数据采集与传输、中央控制系统和 AI 算法，实现了对注塑过程的全面监控和优化。这些技术的发展趋势包括实时监测与控制、预测性维护、智能生产调度和质量控制与追溯。通过这些方法，可以实现更高效、更智能的生产，提高制品的质量和生产效率，同时减少停机时间和维修成本。这些技术不仅提高了生产过程的透明度和可控性，还为未来的智能制造奠定了坚实的基础。

4.1 AI-GAIM 智能化全套解决方案

克劳斯玛菲开发了基于遗传算法和 MLFNN 的气体辅助注塑解决方案，用于生产汽车内饰件。利用遗传算法搜索最优的工艺参数组合，如气体注入时机、压力和流量等。利用 MLFNN 建立输入参数（如气体压力、温度、流量等）和制品质量之间的映射关系，预测和优化制品质量。通过传感器网络实时监测气体压力、温度、流量等参数，并利用 AI 算法实时调整气体注入参数。 通过 AI 算法实时调整注塑参数，能够实时监测和调整气体压力、注入时间和模具温度，提高制品质量和生产效率。利用 AI 技术优化模具设计，减少制品缺陷。通过传感器网络和视觉检测技术，实时监测熔体流动情况和制品质量。集成多种传感器，实现全方位监测。利用历史注塑数据训练 AI 模型，预测不同设计参数对制品质量的影响。利用 AI 算法优化生产调度，减少换模时间和等待时间。

4.2 AI-GAIM 数字孪生技术

西门子的数字孪生技术具有多方面优势，如通过结合多物理场仿真、数据分析和机器学习，可在无需物理原型的情况下展示设计变更等变量的影响，从而缩短开发时间、提高质量；能够利用实时数据不断更新，提供物理资产或系统的准确表示；支持虚拟模型与物理模型间的双向通信，为决策和行动提供依据；允许从虚拟环境中对物理资产或系统进行实时监控，实现远程监控、诊断和预测性维护，优化性能并减少

停机时间。利用数字孪生技术模拟注塑过程中的各种工况，优化模具设计和生产过程。通过虚拟测试验证设计的可行性，确保设计的准确性。

4.3 高精度气体压力控制 AI-GAIM 系统

德国的一些企业研发出了高精度的气体压力控制系统，能够精确地控制气体的注入压力和流量，从而实现更稳定、更均匀的气体辅助注塑成型效果。例如，BAUER 德国宝华的压缩机技术，为气体辅助注塑提供了稳定可靠的气源，其配套的控制系统可以实现对气体压力的精准调节。

4.4 AI-GAIM 智能化的注塑工艺参数优化

德国的一些企业借助 AI 算法和大数据分析，德国企业开发出智能化的注塑工艺参数优化系统。通过对大量生产数据的学习和分析，该系统能够自动调整注塑机的各项参数以及气体辅助注塑的相关参数，以达到最佳的成型效果和生产效率。如伊之密在德国亚琛成立的研发中心，致力于将节能理念与智能化控制技术融入注塑机的研发中，其 FF 全电动注塑机采用了先进的智能控制系统，可实现对注塑过程的精确控制，提高生产效率和产品质量。

4.5 绿色环保型气体辅助注塑技术

法国企业注重研发绿色环保型的气体辅助注塑技术，探索使用新型的气体介质或改进气体回收再利用系统，以减少对环境的影响。例如，研究使用二氧化碳等可回收、无污染的气体作为辅助注塑气体，降低对传统惰性气体的依赖，同时提高气体的回收利用率，降低生产成本。

4.6 多功能一体化 AI-GAIM 系统

法国企业开发多功能一体化的注塑系统，将气体辅佐注塑技术与其他注塑工艺或功能模块相结合，实现多种注塑工艺的灵活切换和协同工作。例如，将气体辅助注塑与双色注塑、共注塑等工艺相结合，生产出具有复杂结构和多种功能的塑料制品，满足不同用户的需求。

4.7 AI-GAIM 微观气体流动模拟与控制技术

日本企业在微观层面的气体流动模拟与控制技术方面取得了进展。通过计算流体动力学（CFD）等先进模拟手段，深入研究气体在熔融塑料中的微观流动行为，并据此开发出更精细的气体控制策略，以实现对注塑成型过程中气体分布的精确控制，进一步提高产品质量。

4.8 AI-GAIM 与机器人技术的融合

将气体辅助注塑控制系统与机器人技术紧密结合，实现注塑生产的自动化和智能化。机器人可以完成物料搬运、模具更换、产品取出等操作，并且与气体辅助注塑系统实现无缝对接，提高生产效率和生产过程的稳定性。

4.9 基于 AI 的质量预测与缺陷检测

美国企业利用 AI 技术开发出质量预测与缺陷检测系统，该系统可以实时监测气体辅助注塑过程中的各项参数和产品的成型情况，通过机器学习算法对数据进行分析和处理，提前预测可能出现的质量问题，并及时发出警报。同时，还能够自动检测产品的缺陷，提高产品的良品率。

4.10 远程监控与诊断技术

随着工业互联网的发展，美国的气体辅助注塑设备制造商推出了远程监控与诊断技术。用户可以通过网络远程监控注塑生产过程，实时查看设备的运行状态、工艺参数和生产数据。一旦设备出现故障，制造商的技术人员可以远程进行诊断和故障排除，减少设备停机时间，提高生产效率。

An analytical study on the scientific development of gas-assisted injection molding technology (AI-GAIM) (Part 1)

Zhang Yougen

(ShanghAIFirst Plastic Machinery Factory, ShanghAI201201, China)

Abstract: TAiming at the problems of insufficient control accuracy of gas path and unstable dimensional and surface quality of products in conventional gasassisted injection molding (GAIM), this paper investigates

the scientific development of artificial intelligencegasassisted injection molding (AI-GAIM). The technical system is sorted out from the perspectives of system framework, AIoptimization strategies for full molding process, intelligent mold design, controlsystem iteration, integration of Internet of Things and big data, and wastegas cleaning treatment. Key technologies and application cases of extended molding processes including carbonfiberreinforced, thermoset, elastomer and microcellular foaming injection are analyzed. The research shows that AI-GAIMrealizes closedloop intelligent regulation of molding process by datadriven method and improves product quality and production efficiency. It is necessary to promote the coordinated development of equipment, process, standard and green manufacturing in future, which provides technical reference for intelligent molding of polymer materials.

Keywords: artificial intelligence; gas-assisted injection molding; intelligent mold; big data; closedloop control

(R-03)

（未完待续）

突发！橡胶助剂 CBS 出口初裁税率高达 107.57%

Breaking news! Preliminary ruling on the export tax rate for rubber chemicals CBS reaches a whopping 107.57%

近日，美国、印度接连发布针对中国橡胶助剂产品的贸易案件裁定和新启动调查公告。

美国作出 CBS 反补贴初裁措施

10 月 6 日，美国商务部发布公告，对进口自中国的 N- 环己基苯并噻唑 –2– 亚磺酰胺（CBS）作出反补贴初裁，初步裁定山东戴瑞克新材料有限公司、山东阳谷华泰进出口有限公司、未应诉公司，以及中国其他企业的补贴税率均为 107.57%。本案主要涉及美国海关编码 2934.20.8000 项下产品。

2026 年 5 月 28 日，美国商务部宣布对进口自中国、马来西亚和越南的 N– 环己基苯并噻唑 –2– 亚磺酰胺发起反倾销和反补贴调查。

印度对华不溶性硫磺启动反补贴调查

9 月 30 日，印度商工部发布公告称，应印度国内企业 OCCL Limited 提交的申请，对原产于或进口自中国的不溶性硫磺启动反补贴调查。本案主要涉及印度海关编码 28020010、38123930 项下产品，以及 38249900 项下部分产品。

本案补贴调查期为 2025 年 4 月 1 日至 2026 年 3 月 31 日，损害调查期为 2022 年 4 月 1 日至 2023 年 3 月 31 日、2023 年 4 月 1 日至 2024 年 3 月 31 日、2024 年 4 月 1 日至 2025 年 3 月 31 日以及 2025 年 4 月 1 日至 2026 年 3 月 31 日。

稍早之前的 9 月 18 日，印度商工部发布公告，对原产于或进口自中国的不溶性硫磺作出反吸收终裁，建议将反倾销税修改为 485 美元 /t（2025 年 6 月 6 日裁定税率为 307 美元 /t），自 2026 年 7 月 3 日起对进口自中国的涉案产品按修改后的反倾销税追溯征收。

印度对华 PTOP 甲醛树脂启动反倾销调查

9 月 28 日，印度商工部发布公告称，应印度国内企业 SI Group India Private Limited 和 Finorchem Limited 提交的申请，对原产于或进口自中国的 PTOP 甲醛树脂 [Para-tert-Octyl Phenol (“PTOP”) Formaldehyde Tackifier Resin] 启动反倾销调查。本案涉及印度海关编码 39094020、39094030 和 39094090 项下的产品。

本案倾销调查期为 2025 年 4 月 1 日至 2026 年 3 月 31 日（12 个月），损害调查期为 2022 年至 2023 年、2023 年至 2024 年、2024 年至 2025 年以及 2025 年 4 月 1 日至 2026 年 3 月 31 日。

摘编自“轮胎观察网”

(R-03)