

制造过程材料缺陷分析与控制

周华龙 周 婷

浙江物产汽车安全科技有限公司 浙江 湖州 313113

摘要：制造过程材料缺陷影响产品质量与性能。本文先对材料缺陷分类并剖析形成机理，阐述检测技术、根因分析工具、数值模拟等分析方法；接着从源头、过程、检测闭环、持续改进等方面提出控制策略；最后分析实施挑战，给出优化根因分析体系、调整成本投入、加强员工培训等对策建议，助力制造企业提升材料缺陷防控水平，保障产品质量。

关键词：材料缺陷；制造过程；缺陷分析；质量控制

引言：在制造业竞争日益激烈的当下，产品质量成为企业生存与发展的关键。制造过程中，材料缺陷作为影响产品质量的重要因素，其分析与控制至关重要。材料缺陷不仅会导致产品性能下降、寿命缩短，还可能引发安全事故，给企业带来巨大损失。因此，深入研究制造过程材料缺陷的分类、形成机理、分析方法及控制策略，具有重要的现实意义。

1 制造过程材料缺陷的分类与形成机理

1.1 材料缺陷的分类

制造过程中材料缺陷的分类需结合缺陷形态、产生阶段及影响范围，形成系统的分类体系，为后续分析与控制提供明确依据。按缺陷存在位置可分为表面缺陷与内部缺陷，表面缺陷包括划痕、裂纹、气孔、夹杂、凹坑等，直观易发现，多影响材料外观与表面性能；内部缺陷包括缩孔、疏松、偏析、内部裂纹等，隐藏于材料内部，需借助专业检测手段识别，对材料强度、韧性等核心性能危害更大。按缺陷形成阶段可分为原材料固有缺陷、加工过程产生缺陷及后续处理缺陷，原材料缺陷源于选材不当或供应商管控不足，加工缺陷由工艺参数偏差等导致，后续处理缺陷则与热处理、表面处理等环节相关^[1]。按缺陷严重程度可分为致命缺陷、严重缺陷、一般缺陷，致命缺陷直接导致材料报废或产品失效，严重缺陷需返工处理，一般缺陷不影响核心性能但需管控。合理分类可精准定位缺陷类型，为机理分析和控制策略制定奠定基础。

1.2 缺陷形成机理分析

制造过程材料缺陷的形成机理复杂，多是材料特性、工艺参数、设备状况、环境因素等多方面共同作用的结果，核心是材料在制造过程中结构、成分或形态出现异常。表面缺陷的形成多与加工过程中的摩擦、碰撞、保护不当相关，如划痕由硬质颗粒摩擦导致，气孔

源于熔炼或铸造时保护气氛不足，凹坑则可能因冲击力过大或表面防护缺失造成。内部缺陷的形成与材料凝固、结晶、应力变化密切相关，缩孔和疏松是液态金属凝固时收缩不均或冷却过快导致，偏析源于熔炼时成分分布不均或热处理时元素扩散异常，内部裂纹则由应力集中、热处理不当或加工载荷过大引发。另外，原材料质量不佳、设备磨损老化、环境温湿度失衡等，会进一步加剧缺陷产生。深入分析缺陷形成机理，本质是明确各影响因素与缺陷之间的关联，为后续缺陷控制提供针对性思路。

2 制造过程材料缺陷的分析方法

2.1 缺陷检测技术

缺陷检测技术是识别材料缺陷的核心手段，需根据缺陷类型、位置及材料特性，选择合适的检测方法，实现缺陷的精准识别、定位与量化。表面缺陷检测以直观检测和无损检测为主，常用方法包括视觉检测、激光扫描、渗透检测、磁粉检测等，其中渗透检测利用毛细现象检测表面开口缺陷，磁粉检测适用于磁性材料表面缺陷，激光扫描可实现表面缺陷的快速精准测量。内部缺陷检测主要依赖无损检测技术，常用的有超声波检测、X射线检测、 γ 射线检测、涡流检测等，超声波检测通过声波反射识别内部裂纹、缩孔等缺陷，X射线和 γ 射线检测利用射线穿透性检测内部缺陷，涡流检测适用于导电材料表面及近表面缺陷检测。近年来，智能无损检测技术快速发展，结合机器学习、大数据分析，实现了缺陷的自动识别与分类，提升了检测效率和精度，为缺陷分析提供了更可靠的技术支撑。

2.2 缺陷根因分析工具

缺陷根因分析工具是突破“只发现缺陷、不解决根源”困境的关键，通过系统化工具梳理影响因素，精准定位缺陷产生的核心原因，避免缺陷重复出现。常用的

根因分析工具包括5Why分析法、鱼骨图（因果图）、故障模式与影响分析（FMEA）、帕累托分析等。5Why分析法通过连续追问“为什么”，层层深入挖掘缺陷背后的根本原因，避免停留在表面现象；鱼骨图将缺陷作为结果，从材料、工艺、设备、人员、环境等维度梳理可能的影响因素，清晰呈现各因素与缺陷的关联关系。FMEA通过提前识别潜在缺陷模式，分析其影响程度和发生概率，为根因分析提供预判依据；帕累托分析则聚焦关键少数缺陷，优先解决影响最大的根因^[2]。实际应用中，需结合多种工具，结合生产实际数据，全面排查各环节隐患，确保根因分析的准确性和全面性，为后续控制策略制定提供科学依据。

2.3 数值模拟与预测

数值模拟与预测技术借助计算机仿真手段，模拟制造过程中材料的变化规律，提前预测缺陷的产生趋势，实现缺陷的前置防控，降低缺陷产生的概率。该技术基于材料科学、力学、热力学等理论，通过建立数学模型，模拟材料在熔炼、铸造、加工、热处理等环节的温度场、应力场、微观组织演变等过程，精准预测可能出现的缺陷类型、位置及严重程度。常用的数值模拟软件包括模流分析（Moldflow）、有限元分析（FEA）等，其中Moldflow可模拟注塑过程中的缺陷，如缩痕、熔接痕等，FEA可模拟加工过程中的应力分布，预测裂纹等缺陷。结合机器学习、大数据分析，可进一步优化模拟模型，提升预测精度，同时通过模拟不同工艺参数下的缺陷产生情况，为工艺参数优化提供数据支撑。数值模拟与预测技术打破了传统“试错式”生产模式，减少试验成本，提升缺陷防控的主动性和科学性。

3 制造过程材料缺陷的控制策略

3.1 源头控制：材料选择与预处理

源头控制是材料缺陷防控的第一道防线，核心是通过科学的材料选择和规范的预处理，从根本上减少缺陷产生的可能性，为后续制造环节奠定良好基础。材料选择需结合产品性能要求、制造工艺特点，严格筛选原材料，优先选择成分均匀、性能稳定、无固有缺陷的材料，同时建立供应商管控体系，对原材料进行严格检验，杜绝不合格原材料进入生产环节。材料预处理是消除原材料缺陷、改善材料加工性能的关键，常用的预处理方法包括干燥、除锈、退火、正火等。例如，对易吸水的塑料粒料进行干燥处理，可避免注塑过程中产生气孔；对金属材料进行退火处理，可消除内应力，减少加工过程中裂纹的产生；对原材料进行除锈、除杂处理，可避免杂质导致的夹杂缺陷。通过规范的材料选择和预

处理，可有效降低原材料本身及后续加工过程中缺陷的产生概率，实现缺陷的源头管控。

3.2 过程控制：工艺参数优化与实时监控

3.2.1 参数优化

工艺参数优化是过程控制的核心，通过调整制造过程中的关键工艺参数，使材料加工处于最优状态，减少因参数偏差导致的缺陷。不同制造工艺的关键参数不同，如注塑工艺中的料温、注射压力、保压时间、模温，焊接工艺中的焊接电流、焊接速度、热输入量，铸造工艺中的浇注温度、冷却速度等^[3]。参数优化需结合数值模拟结果和生产实际数据，通过试验设计、正交试验等方法，确定各参数的最优范围，避免参数过高、过低或波动过大导致缺陷。优化保压压力和时间，可避免产品出现凹陷、缩孔；焊接工艺中，控制热输入量在最优区间，可避免焊缝裂纹、未焊透等缺陷。同时需根据材料特性、设备状况及时调整工艺参数，确保参数的稳定性和适配性，从过程中减少缺陷产生。

3.2.2 实时监控

实时监控是保障工艺参数稳定、及时发现过程异常的关键手段，通过搭建完善的监控体系，对制造过程中的关键参数、设备状态、材料状态进行实时监控，实现异常的快速预警和处理。监控内容包括工艺参数（如温度、压力、速度）、设备运行状态（如设备振动、磨损）、材料加工状态（如熔体流动、工件变形）等。采用自动化监控设备，如温度传感器、压力传感器、振动传感器等，实时采集数据，通过MES系统、安灯系统等实现数据可视化和异常报警。当监测到参数超出最优范围或设备出现异常时，系统及时发出预警，工作人员快速介入调整，避免缺陷批量产生。例如，在注塑生产中，实时监控料温、模温，当温度出现波动时，及时调整加热系统，防止气孔、缩痕等缺陷；在机械加工中，监控切削速度、进给量，避免刀具磨损导致的划痕、裂纹缺陷。

3.3 缺陷检测与闭环控制

缺陷检测与闭环控制是确保缺陷及时处理、避免缺陷流向下游的关键，构建“检测-识别-处理-反馈-优化”的闭环体系，实现缺陷的全流程管控。首先，结合前文所述的缺陷检测技术，在制造各环节设置检测点，对原材料、半成品、成品进行全面检测，确保所有缺陷都能被及时识别。其次，对检测出的缺陷进行分类、统计，分析缺陷产生的原因，针对性采取返工、返修、报废等处理措施，避免不合格产品流入下一道工序。然后，将缺陷相关数据反馈至工艺、设备、原材料等相关环节，

结合根因分析结果,调整工艺参数、优化设备状态、加强原材料管控,从源头避免同类缺陷重复出现。最后,建立缺陷档案,记录缺陷类型、产生原因、处理措施及效果,形成数据积累,为后续缺陷防控和流程优化提供支撑,实现缺陷管控的闭环管理,持续提升产品质量。

3.4 持续改进机制

持续改进机制是长期控制材料缺陷、提升制造质量的核心保障,通过建立常态化的改进体系,不断发现问题、解决问题,推动缺陷防控水平持续提升。该机制需贯穿制造全流程,建立缺陷统计分析体系,定期对缺陷数据进行汇总、分析,识别缺陷产生的规律和薄弱环节,明确改进重点。建立跨部门改进团队,整合生产、技术、质量、设备等部门资源,针对高频缺陷、重大缺陷开展专项改进活动,制定改进方案、明确责任人和改进时限,确保改进措施落地见效。同时加强员工培训,提升员工的质量意识和操作技能,鼓励员工主动发现问题、提出改进建议,形成全员参与的改进氛围。结合行业先进技术和经验,持续优化检测方法、工艺参数、管控体系,定期开展改进效果验证,将有效的改进措施标准化、规范化,融入生产流程,实现缺陷防控水平的持续提升,推动制造质量不断优化。

4 挑战与对策建议

4.1 实施挑战

在制造过程材料缺陷管控的实施过程中,面临多方面挑战,制约了缺陷防控效果的充分发挥。一是多因素耦合导致缺陷根因难以精准定位,制造过程中材料、工艺、设备、环境等因素相互影响,部分缺陷由多种因素共同作用产生,传统分析方法难以全面排查,导致根因识别不精准,改进措施针对性不足。二是中小制造企业面临成本压力,先进的检测设备、数值模拟软件、自动化监控系统投入成本较高,中小企业难以承担,导致检测精度和监控效率不足,缺陷防控水平有限。三是员工专业能力参差不齐,部分员工缺乏缺陷识别、根因分析、设备操作等专业技能,难以适应精细化管控的需求,易因操作不当导致缺陷产生。四是多环节协同不足,原材料管控、工艺执行、检测处理、改进优化等环节缺乏有效协同,易出现责任推诿、信息传递不畅等问题,影响闭环管控效果。此外,行业技术快速迭代,新型材料、新型工艺不断涌现,也对缺陷管控提出了更高要求。

4.2 对策建议

针对制造过程材料缺陷管控的实施挑战,结合行业实践经验,提出针对性对策建议,推动缺陷管控工作有序开展、落地见效。一是优化根因分析体系,结合5Why分析法、FMEA等工具,整合数值模拟、大数据分析技术,建立多因素耦合分析模型,提升根因识别的精准度,为改进措施制定提供科学依据。二是优化成本投入结构,中小企业可优先引入性价比高的检测设备和监控工具,依托行业平台实现资源共享,降低投入成本;大型企业可加大先进技术投入,搭建智能化管控体系,提升管控效率^[4]。三是加强员工培训,建立“理论讲解+实操演练+考核认证”的培训体系,重点提升员工的缺陷识别、设备操作、根因分析能力,建立激励机制,鼓励员工主动参与缺陷防控和改进工作。四是强化多环节协同,建立跨部门协同机制,明确各环节责任,实现原材料管控、工艺执行、检测处理、改进优化等环节的信息共享、高效联动,完善闭环管控体系。同时加强行业交流与合作,借鉴先进企业的管控经验,跟踪新型材料、新型工艺的缺陷防控技术,持续优化管控策略,提升缺陷防控水平。

结束语

制造过程材料缺陷分析与控制是一项长期且复杂的系统工程。尽管在实施过程中面临多因素耦合、成本压力、员工能力及多环节协同等诸多挑战,但通过优化根因分析体系、合理投入成本、加强员工培训、强化多环节协同等针对性对策,可有效提升缺陷防控水平。企业应持续关注行业动态,不断优化管控策略,以适应新型材料与工艺的发展,保障产品质量,提升市场竞争力。

参考文献

- [1]周盼,房晓斌,宋旭晖,等.复合材料C型梁制造缺陷占比分析及预防与控制[J].粘接,2024,51(12):69-71,79.
- [2]周璇,李乔磊,张婷婷,等.光固化增材制造陶瓷型芯缺陷分析及调控机制研究进展[J].材料工程,2026,54(2):15-27.
- [3]帅文翰.金属粉末增材制造中的缺陷形成机制及质量控制策略研究[J].中国金属通报,2025(17):162-164.
- [4]荀国立,李跃,周长庚,等.基于材料特性研究的聚酰亚胺加筋壁板缺陷控制[J].航空制造技术,2025,68(16):73-78.