

基于有限元分析的注塑产品复杂曲面结构设计优化

李明博

秦皇岛耀华装备集团股份有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘要: 通过探讨基于有限元分析的注塑产品复杂曲面结构设计优化方法。针对注塑产品在复杂曲面结构设计上常面临的强度不足、成型缺陷等问题,本文运用有限元分析技术对产品的应力分布、变形情况以及注塑成型过程进行全面模拟与分析。通过识别潜在的问题区域,优化结构设计,调整模具流道和注塑工艺参数,实现产品性能的显著提升。该优化方法不仅提高产品的质量和可靠性,还降低制造成本,为注塑产品复杂曲面结构的设计优化提供有力支持。

关键词: 有限元分析; 注塑产品; 复杂曲面结构; 设计优化

1 注塑成型技术与复杂曲面结构概述

注塑成型技术,作为塑料制品制造领域的核心技术之一,凭借其高效、灵活及成本效益显著的特点,广泛应用于汽车、电子、医疗、航空航天等多个行业。该技术通过精确控制熔融塑料在模具中的流动与固化,快速成型出具有复杂形状与精细细节的产品。注塑成型不仅能实现大批量生产,还能满足个性化定制需求,是现代工业生产不可或缺的一环。复杂曲面结构,以其独特的形态美感和功能特性,成为现代产品设计的重要趋势。这类结构往往包含非对称、多曲面、变厚度等特征,旨在提升产品的视觉效果、增强用户体验或满足特定的物理性能要求。然而,复杂曲面结构的制造却面临诸多挑战,尤其是在注塑成型过程中。熔融塑料在模具内的流动行为极为复杂,受到模具设计、注射速度、温度控制、材料特性等多重因素的共同影响,容易导致填充不均、熔接线、气泡、烧焦等成型缺陷,进而影响产品的整体质量和可靠性。针对复杂曲面结构的注塑成型,不仅需要先进的模具设计技术,以确保塑料能够均匀、快速地填充整个型腔;还需精确的工艺参数调控,如注射速度、压力、温度曲线的优化,以最大限度地减少成型缺陷,提升产品良率。材料的选择与改性也是关键因素,它直接影响到产品的物理性能、加工性能及最终的应用表现。

2 注塑产品复杂曲面结构设计存在的问题

2.1 结构强度与刚度不足

复杂曲面结构的注塑产品在设计和制造过程中,往往面临着结构强度与刚度不足的问题。复杂曲面结构对材料的性能要求较高,如果选择的材料强度或刚度不足,将直接影响产品的使用性能和寿命。复杂曲面结构的设计需要综合考虑产品的功能需求、制造工艺和成本等因素^[1]。如果设计不合理,如壁厚分布不均、加强筋设

置不当等,将导致产品的结构强度与刚度不足。注塑成型过程中,由于塑料的流动性和冷却收缩等特性,往往难以完全保证复杂曲面结构的精度和尺寸稳定性。这可能导致产品在使用过程中出现变形、开裂等问题,从而影响其结构强度与刚度。

2.2 注塑成型缺陷

注塑成型过程中,复杂曲面结构的产品容易出现多种缺陷,这些缺陷不仅影响产品的外观质量,还可能影响其使用性能和寿命。由于熔体流动性低、模具排气结构设计不合理或注射压力不足等原因,导致塑料没有完全充满模具型腔。由于模具配合公差较大、合模力不足或熔体温度过高等原因,导致塑料在模具分型线上溢出形成飞边。由于模具排气不佳、注射速度过高或空气无法从模具分型面逸出等原因,导致塑料在模具内过热而烧焦。已经开始冷却的塑料熔体注入空腔后产生的痕迹,这通常是由于喷嘴加热不足或热流道尖端泄漏等原因造成的。

2.3 设计与制造的协同问题

在复杂曲面结构的注塑产品设计和制造过程中,设计与制造的协同问题同样不容忽视。设计和制造部门之间缺乏有效的信息沟通机制,导致设计意图难以准确传达给制造部门,或者制造过程中的问题无法及时反馈给设计部门。设计师对注塑成型工艺的理解不足,导致设计出的产品难以用现有的制造工艺实现。同样,制造工程师对设计要求的理解不足也可能导致制造过程中的偏差和缺陷。设计和制造过程中使用的数据不一致,如模具尺寸、材料性能等,这可能导致产品在制造过程中出现偏差或缺陷。

3 基于有限元分析的注塑产品复杂曲面结构设计优化流程

3.1 有限元模型建立与验证

在注塑产品复杂曲面结构的设计优化流程中,有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)扮演着至关重要的角色。有限元模型建立与验证是整个优化流程的基石,它直接关系到后续分析的准确性和可靠性。有限元模型的建立始于对复杂曲面结构的几何描述。这通常涉及使用CAD软件创建精确的三维模型,并将其导入到有限元分析软件中。在导入过程中,需要确保几何信息的完整性和准确性,以避免在后续分析中出现误差。根据产品的材料属性和预期的工作条件,为模型分配适当的材料属性和边界条件。在网格划分阶段,需要根据结构的复杂性和分析精度要求,选择合适的网格类型和尺寸。对于复杂曲面结构,通常采用四面体或六面体网格进行划分,以确保网格能够适应曲面的变化,并捕捉到关键的应力集中区域。网格的质量对分析结果的准确性有着直接影响,因此需要进行网格收敛性分析,以确定最佳的网格密度^[2]。有限元模型的验证是确保分析结果可靠性的关键步骤,这通常涉及将有限元分析结果与已知的实验数据或理论解进行比较。如果两者之间的差异在可接受的范围内,则可以认为模型是有效的。然而,由于复杂曲面结构的特殊性,往往难以获取直接的实验数据或理论解进行验证。可以采用间接验证方法,如与其他成熟的分析软件或方法进行对比,或者通过制造原型并进行简单的测试来验证模型的某些关键特性。

3.2 结构强度与刚度优化

在建立准确的有限元模型并进行验证之后,接下来就可以进行结构强度与刚度的优化。结构强度的优化主要关注产品在承受预期载荷时是否会发生破坏。这通常涉及对模型进行静力分析或疲劳分析,以评估其在不同工况下的应力分布和疲劳寿命。在静力分析中,需要施加适当的载荷和约束条件,并观察模型的应力分布。如果发现应力集中区域或超过材料许用应力的区域,就需要对这些区域进行优化设计,以降低应力水平。疲劳分析则更加复杂,因为它需要考虑载荷的循环特性和材料的疲劳性能。这通常涉及对模型进行循环加载,并观察其应力-应变响应。根据疲劳寿命预测结果,可以对结构进行必要的调整,以提高其抗疲劳性能。结构刚度的优化主要关注产品在受到外力作用时是否会发生过大的变形。这通常涉及对模型进行模态分析或动态响应分析。模态分析可以揭示结构的固有频率和振型,从而评估其在动态载荷下的稳定性。动态响应分析则可以观察结构在特定激励下的位移和加速度响应,以评估其刚度是否满足要求。为了提高结构的刚度,可以考虑增加壁厚、添加加强筋或改变结构的拓扑形状等方法。这些方法都需要在有限元模型中进行模拟和验证,以确保优化后的结构既满足刚度要求,又不会引入其他潜在的问题。

3.3 注塑成型缺陷控制

注塑成型缺陷是影响产品质量和性能的关键因素之一。在复杂曲面结构的设计优化流程中,必须充分考虑注塑成型缺陷的控制。注塑成型缺陷种类繁多,如填充不足、飞边、烧焦、熔接线等。这些缺陷的成因复杂多样,可能涉及模具设计、材料选择、注射工艺参数等多个方面。因此在进行缺陷控制之前,需要对缺陷的类型和成因进行深入的分析。借助有限元分析软件中的注塑成型模拟模块,可以对注塑过程中的熔体流动、温度分布、压力变化等进行模拟和预测。这有助于识别出潜在的缺陷区域和成因,并在设计阶段就采取相应的措施进行预防^[3]。在识别出潜在的缺陷区域和成因后,就需要采取相应的措施进行控制和优化。这可能涉及对模具设计的调整、对材料的选择和改性、对注射工艺参数的优化等多个方面。

3.4 设计与制造协同优化

在注塑产品复杂曲面结构的设计优化流程中,设计与制造的协同优化是实现高效、高质量生产的关键。设计与制造部门之间的信息共享和沟通是协同优化的基础,这涉及将设计数据、分析结果、制造工艺参数等信息在部门之间进行实时传递和共享。通过定期召开跨部门会议、使用协同设计平台等方式,可以加强设计与制造部门之间的沟通和协作,确保设计意图能够准确传达给制造部门,并在制造过程中得到忠实执行。设计师需要对注塑成型工艺有深入的理解,以便在设计阶段就考虑到制造工艺的限制和要求。这有助于避免设计出无法用现有制造工艺实现的产品。制造工程师也需要对设计要求有充分的认识,以便在制造过程中灵活调整工艺参数和设备配置,以适应设计的特殊要求。通过加强设计与制造部门之间的工艺理解和适应性设计,可以显著提高产品的质量和生产效率。设计与制造协同优化的过程是一个不断迭代和持续改进的过程。在制造过程中发现的问题和缺陷需要及时反馈给设计部门,以便进行设计调整和优化。设计部门也需要根据市场反馈和用户需求的变化,不断更新和优化产品设计。

4 案例分析

4.1 某注塑产品复杂曲面结构优化案例

本案例涉及一款具有复杂曲面结构的注塑产品,该产品在初步设计阶段存在一系列性能问题,包括结构刚度不足、注塑成型缺陷频发以及制造成本过高等。针对这些问题,设计团队决定采用有限元分析(FEA)方法

进行结构优化设计。产品原型在初步测试中表现出明显的结构强度不足，特别是在曲面连接处和边角区域。这些区域在受力时容易出现裂纹和变形，严重影响产品的使用寿命和安全性。注塑成型过程中频繁出现的填充不足、熔接线和烧焦等缺陷也导致产品合格率的下降。制造成本方面，由于设计复杂度高，模具制造和注塑工艺的调整成本也随之增加。针对上述问题，设计团队首先利用CAD软件对产品进行三维建模，并导入到有限元分析软件中进行网格划分和材料属性设置。通过对模型进行静力分析和模态分析，团队识别出应力集中区域和潜在的变形区域。借助注塑成型模拟模块，团队对熔体流动、温度分布和压力变化进行预测，找出潜在的缺陷区域和成因。基于分析结果，设计团队对产品结构进行优化，通过增加加强筋、调整壁厚和优化曲面形状，提高产品的结构强度和刚度。通过优化模具流道设计、排气系统和注射工艺参数，有效控制了注塑成型缺陷的发生。这些优化措施不仅提高产品的质量和性能，还降低制造成本。优化后的产品在后续测试中表现出色，结构强度得到显著提升，注塑成型缺陷率也大幅下降。由于设计更加合理，模具制造和注塑工艺的调整成本也相应降低。

4.2 有限元分析过程与结果

在本案例中，有限元分析过程主要包括以下几个步骤：步骤一：模型建立与网格划分，设计团队首先利用CAD软件创建了产品的三维模型，并将其导入到有限元分析软件中。在软件中，团队对模型进行了网格划分，选择了适合复杂曲面结构的四面体网格类型，并设置了合理的网格密度以确保分析结果的准确性。步骤二：材料属性设置与边界条件施加，团队为模型分配了相应的材料属性，包括弹性模量、泊松比、密度等。根据产品的实际使用场景和受力情况，施加了合理的边界条件和载荷。这些边界条件和载荷能够真实反映产品在实际使用中的受力状态^[4]。步骤三：静力分析与模态分析，完成材料属性设置和边界条件施加后，团队对模型进行了静力分析和模态分析。静力分析用于评估产品在承受静态载荷时的应力分布和变形情况；模态分析则用于揭示产品的固有频率和振型，以评估其在动态载荷下的稳定

性。分析结果：通过分析结果，团队发现产品在曲面连接处和边角区域存在明显的应力集中现象。这些区域的应力水平超过材料的许用应力，容易导致裂纹和变形。模态分析结果显示，产品的某些固有频率与工作环境中的激励频率相近，存在共振的风险。这可能导致产品在长期使用过程中出现疲劳损伤。

步骤四：注塑成型模拟与优化，针对注塑成型缺陷问题，团队利用有限元分析软件中的注塑成型模拟模块进行模拟分析。通过预测熔体流动、温度分布和压力变化，团队找出潜在的缺陷区域和成因。

分析结果：模拟结果显示，模具流道设计不合理导致熔体流动不畅，特别是在曲面连接处和边角区域。这容易导致填充不足和熔接线等缺陷的发生。通过分析温度分布和压力变化，团队发现注塑工艺参数设置不当导致烧焦缺陷的出现。特别是在高温高压区域，材料容易发生热降解和烧焦。基于上述分析结果，设计团队对产品结构进行优化调整，并重新进行有限元分析以验证优化效果。优化后的产品在后续测试中表现出色，成功解决结构强度不足、注塑成型缺陷频发以及制造成本过高等问题。

结束语

通过对注塑产品复杂曲面结构进行基于有限元分析的设计优化，我们成功解决了传统设计方法难以解决的一系列问题。本文提出的优化方法不仅具有理论意义，更在实际应用中取得了显著成效。未来，将继续探索更多先进的有限元分析技术和优化算法，以进一步提升注塑产品的性能和制造效率，推动注塑行业的持续创新与发展。

参考文献

- [1]刘向刚,陈剑峰,杨越,等.复杂山地多跨单曲拱-斜柱结构设计与有限元分析[J].建筑结构,2022,52(S1):673-679.
- [2]吴琼.复杂组合水池结构设计要点及变壁厚池壁有限元分析[J].特种结构,2020,37(03):7-11.
- [3]赵开祖.基于有限元分析的建筑结构设计[J].中国建筑金属结构,2023,22(11):128-130.DOI:10.20080
- [4]戴丽薇.民用建筑结构设计中的基础设计[J].工程建设与设计,2023(22):16-18.DOI:10.13616