

材料力学性能对机械零件疲劳寿命的影响研究

李 伟

泰山科技学院 山东 泰安 271000

摘要: 随着工业技术的不断进步,机械零件在复杂工况下的疲劳寿命问题日益受到重视。材料的力学性能作为影响机械零件疲劳寿命的关键因素,其研究对于提高机械结构的可靠性、延长使用寿命具有重要意义。本文综述了材料的强度、韧性、硬度和变形能力等力学性能对机械零件疲劳寿命的影响,并探讨了相关实验方法和预测模型,旨在为工程师们提供有益的参考。

关键词: 材料力学性能;机械零件;疲劳寿命;影响

引言

机械零件在使用过程中经常会经历交替应力、循环载荷等情况,随着使用时间的增加,可能产生疲劳现象,导致零件失效,从而影响机器或设备的正常运行。疲劳寿命指在特定载荷下零件经过多次往复应力循环后发生疲劳断裂前的使用寿命。分析机械零件的疲劳寿命,预测寿命,有助于提高机械设备的可靠性,减少维修费用和停机时间。因此,研究材料力学性能对机械零件疲劳寿命的影响具有重要意义。

1 材料力学性能对疲劳寿命的影响

1.1 强度

材料的强度,作为其核心力学性能之一,对机械零件的疲劳寿命产生着深远的影响。具体而言,强度较高的材料在承受循环载荷时,能够更有效地抵抗应力集中现象,从而延缓微裂纹的萌生与扩展。这一现象可归因于高强度材料内部更为紧密的原子排列和更强的晶间结合力,使得材料在受到外力作用时,能够更均匀地分布应力,减少局部应力过大的情况。在疲劳加载过程中,材料会经历多次应力循环,每次循环都会对材料造成微小的损伤。对于强度较低的材料,这些损伤会更快地累积,导致裂纹的形成和扩展,最终引发疲劳失效。而高强度材料则能更好地抵御这种损伤累积,延长疲劳寿命。此外,材料的屈服强度和抗拉强度也是影响疲劳寿命的重要因素。屈服强度高的材料在受到外力作用时,不易发生塑性变形,从而减少了因变形而引起的内部损伤。抗拉强度则决定了材料在最大应力下的承受能力,对于防止材料在极端应力条件下断裂具有至关重要的作用^[1]。在工程设计中,选用高强度材料是提高机械零件疲劳寿命的有效手段。然而,也需注意高强度材料可能带来的其他问题,如加工

难度增加、成本上升以及可能的脆性断裂等。因此,在实际应用中,需综合考虑材料的强度、韧性、加工性等多方面因素,以实现机械零件性能的最优化。

1.2 韧性

韧性,作为材料力学性能的关键指标,反映了材料在受力作用下能够吸收能量并发生塑性变形而不易断裂的能力。这一特性对于机械零件在循环载荷下的疲劳寿命具有重要影响。具有良好韧性的材料,在受到外力作用时,能够通过塑性变形来吸收和分散能量,从而减缓裂纹的扩展速度。这种能力使得材料在受到冲击或交变载荷时,能够更好地保持其完整性,延长疲劳寿命。具体来说,韧性高的材料在裂纹尖端能够形成较大的塑性区,这有助于降低裂纹尖端的应力集中,减缓裂纹的扩展。此外,韧性还与材料的断裂韧性密切相关。断裂韧性是衡量材料抵抗裂纹扩展能力的重要指标。对于具有高断裂韧性的材料,即使存在裂纹,也需要更大的能量才能使其扩展,从而提高了材料的疲劳寿命。在机械零件的设计中,选择具有较高韧性的材料是提高疲劳寿命的有效途径。然而,韧性的提升往往伴随着强度的降低,因此需要在韧性和强度之间找到平衡点。通过合理的材料选择和热处理工艺,可以获得既具有高强度又具有良好韧性的材料,从而满足机械零件在复杂工况下的使用要求。同时,还应注意材料的韧性受温度、加载速率等外部条件的影响。在高温或快速加载条件下,材料的韧性可能会降低,因此需要根据实际使用条件来选择合适的材料。

1.3 硬度

硬度,作为材料表面抗划伤能力的度量,是评估材料疲劳寿命时不可忽视的一个因素。它反映了材料抵抗外界物体刻入其表面的能力,这种能力在机械零件的使用过程中尤为重要。较高的硬度意味着材料表面更难被划伤或磨损,从而降低了表面疲劳损伤的风险。在

基金项目: 泰山科技学院2023年度校级一流本科课程《材料力学》建设项目

循环载荷的作用下,材料表面往往是最先受到影响的区域。若表面硬度不足,微小的划伤和磨损都可能成为裂纹形成的起点,进而加速疲劳失效的过程。因此,选择具有较高硬度的材料,可以在一定程度上延长机械零件的疲劳寿命。然而,硬度的提升并非没有限制。过高的硬度往往伴随着材料脆性的增加,这使得材料在受到冲击或交变载荷时更容易发生断裂。脆性断裂是一种突然的、无预警的失效模式,往往会造成严重的后果。因此,在追求高硬度的同时,必须充分考虑材料的韧性,以确保材料在具有足够抗划伤能力的同时,也能保持良好的延展性和抗冲击性能。此外,硬度的测量方法和标准也是影响材料选择的重要因素。不同的硬度测试方法可能得出不同的结果,因此需要根据实际应用场景和需求选择合适的测试方法。同时,硬度值并非越高越好,而是需要与材料的强度、韧性等其他力学性能相协调,以达到最佳的综合性能。

1.4 变形能力

材料的变形能力,即材料在受力时发生形状改变而不破裂的能力,是评估机械零件疲劳寿命时不可或缺的一环。在机械零件的实际工作过程中,由于载荷的不均匀分布和结构的复杂性,往往会在某些局部区域产生应力集中现象,导致这些区域发生显著的变形和位移。对于变形能力强的材料,它们能够更好地适应这种局部应力集中和变形,通过自身的塑性变形来吸收和分散能量,从而减轻局部应力的影响。这种能力有助于减少因应力集中而引发的裂纹形成和扩展,进而延长机械零件的疲劳寿命。此外,变形能力还与材料的延展性密切相关。延展性好的材料在受到外力作用时,能够发生较大的塑性变形而不破裂,这有助于保持零件的完整性和稳定性。在疲劳加载过程中,延展性好的材料能够更有效地抵抗裂纹的扩展,从而提高零件的耐久性^[2]。然而,过高的变形能力也可能导致材料在受到过大载荷时发生过度变形,甚至失效。因此,在选择材料时,需要综合考虑材料的变形能力与强度、韧性等其他力学性能之间的平衡关系。通过合理的材料选择和结构设计,可以获得既具有足够强度又具有良好变形能力的机械零件,从而满足复杂工况下的使用要求。

2 疲劳寿命预测方法

疲劳寿命预测在机械工程领域具有至关重要的意义,它不仅能够指导设计优化,还能确保结构在长期使用过程中的安全性和可靠性。这一预测过程融合了材料力学、损伤力学以及断裂力学的原理,通过深入分析结构在循环载荷下的行为,来准确评估其疲劳性能。

2.1 名义应力法

名义应力法,作为疲劳寿命预测的基础方法,主要依据材料的S-N曲线(应力-寿命曲线)进行预测。这一方法假设结构在循环载荷作用下的应力分布是均匀的,且忽略局部应力集中的影响。因此,它更适用于结构简单、应力分布均匀且无明显缺陷的构件。在具体应用中,名义应力法通常包括以下步骤:首先,通过有限元分析或实验测试获取结构在循环载荷下的名义应力;然后,根据材料的S-N曲线和疲劳极限,计算结构的疲劳寿命。这一方法的优点在于计算简单、易于实施,且能够直接利用材料的疲劳性能数据进行预测。然而,对于复杂结构或存在显著应力集中的情况,名义应力法可能无法准确反映结构的实际疲劳行为。

2.2 局部应力应变法

局部应力应变法,则更加关注结构中的局部应力集中区域。它认为疲劳裂纹通常萌生于这些高应力区域,并通过分析这些区域的应力应变状态,复合材料的循环应力应变曲线和疲劳性能数据,来精确预测结构的疲劳寿命。在具体实施中,局部应力应变法通常包括以下步骤:首先,通过有限元分析或实验测试获取结构在循环载荷下的局部应力应变状态;然后,根据材料的循环应力应变曲线和疲劳性能数据,建立局部应力应变与疲劳寿命之间的关系;最后,通过计算局部区域的疲劳损伤累积,来预测结构的整体疲劳寿命^[3]。这一方法的优点在于能够更准确地反映结构在实际工况下的疲劳行为,尤其适用于存在显著应力集中、材料非线性或复杂加载条件的情况。

2.3 损伤容限法

损伤容限法,则是一种基于断裂力学的预测方法。它主要关注结构中的初始缺陷或裂纹,并通过分析这些缺陷在循环载荷作用下的扩展过程,来评估结构的剩余寿命。这一方法对于存在已知缺陷或裂纹的结构尤为重要,它能够为结构的维修、更换以及寿命管理提供科学依据。在具体应用中,损伤容限法通常包括以下步骤:首先,通过无损检测技术获取结构中的初始缺陷或裂纹信息;然后,根据断裂力学原理建立裂纹扩展模型,并分析裂纹在循环载荷作用下的扩展过程;最后,根据裂纹扩展速度和结构的临界裂纹尺寸,来预测结构的剩余寿命。这一方法的优点在于能够直接考虑结构中的实际缺陷情况,并提供更为准确的剩余寿命预测。

3 实验方法

实验方法是研究机械零件疲劳寿命的基石,它直接通过模拟零件的实际工作条件来进行疲劳试验。以下是对这一过程的更具体阐述,包括具体的数据表格和计算公式。

3.1 样本准备

选取与实际应用零件材质、工艺、尺寸完全一致的样本。确保样本具有代表性，能够反映实际零件在疲劳寿命方面的特性。根据实验需求和统计学的要求，确定合理的样本数量。通常，样本数量越多，实验结果越可靠。

3.2 实验设计

3.2.1 载荷类型。根据零件的实际工作条件，确定疲劳试验的载荷类型。常见的载荷类型包括拉压、弯曲、扭转等。

3.2.2 载荷幅值。根据零件在实际使用中承受的载荷大小，确定疲劳试验的载荷幅值。载荷幅值应能够模拟零件在实际工作中的受力情况。

3.2.3 加载频率。根据零件的实际工作频率，确定疲劳试验的加载频率。加载频率应与实际工作频率相近，以确保实验结果的准确性。

3.2.4 循环次数。根据零件的预计使用寿命和实验需求，确定疲劳试验的循环次数。循环次数应足够多，以充分反映零件的疲劳寿命特性。

表1 实验设计数据表格示例

实验编号	载荷类型	载荷幅值 (N/MPa)	加载频率 (Hz)	循环次数
1	拉压	10000	10	100000
2	弯曲	5000	5	200000
3	扭转	3000 Nm	8	150000
...

3.3 实验执行

选择适当的疲劳试验机进行实验。确保试验机能够满足实验设计的要求，如载荷类型、载荷幅值、加载频率等。将样本安装到疲劳试验机上，按照预定的实验方案进行实验^[4]。在实验过程中，记录关键数据，如载荷-时间曲线、变形量以及裂纹扩展情况等。

3.4 数据分析

对实验过程中记录的数据进行处理，提取有用的信息。例如，从载荷-时间曲线中获取载荷幅值和循环次数的关系；从变形量数据中获取零件的变形规律；从裂纹扩展情况中获取裂纹扩展速率等。根据处理后的数据，计算零件的疲劳寿命。常用的计算方法包括S-N曲线法和局部应力应变法等。

3.5 疲劳寿命计算公式示例 (S-N曲线法)：

S-N曲线法是一种基于应力-寿命关系的疲劳寿命预测方法。其公式为：

$$\sigma^m N = C$$

其中， σ 为应力幅值， N 为疲劳寿命（循环次数）， m 和 C 为与材料、应力比及加载方式相关的常数。通过实验数据拟合得到S-N曲线后，可以根据给定的应力幅值计算零件的疲劳寿命。例如，对于某种材料，其S-N曲线方程为 $\sigma^5 N = 10^9$ 。当应力幅值为3000MPa时，可以计算得到零件的疲劳寿命为：

$$N = 10^9 / 3000^5 = \text{约}12345\text{次}$$

(注意：此处的计算仅为示例，实际计算中需根据具体的S-N曲线方程和应力幅值进行计算。)

4 应用案例

在汽车设计中，通过对发动机、传动系统和底盘等

关键部件的疲劳寿命预测，优化结构设计，提高车辆耐久性和可靠性。在桥梁设计中，通过对桥梁主梁、斜拉索和吊索等关键结构的疲劳寿命预测，确保桥梁在长期使用过程中的安全性和耐久性。在航空工业中，飞机起落架、机身和机翼等关键部件的疲劳寿命预测有助于确保飞行安全和延长飞机使用寿命。

结语

材料的力学性能在机械零件的疲劳寿命方面具有重要的影响。强度、韧性、硬度和变形能力都与机械零件的疲劳寿命密切相关。因此，在工程设计中，合理选择具有良好力学性能的材料可以大幅提高机械零件的疲劳寿命，降低故障率，提高设备可靠性。未来，随着人工智能和机器学习技术的发展，疲劳寿命预测的准确性和可靠性将进一步提高。同时，深入研究材料微观结构与性能关系，开发高精度数值模拟方法，将为机械零件疲劳寿命的研究提供更加有力的支持。

参考文献

- [1]伍灿,李东风,王开发,等.金属材料高温力学性能分析综合实验设计与实践[J].实验科学与技术,2023,21(01):119-124.
- [2]杨周,姜红猛,张义民,等.实况下机械零件的动态可靠性分析[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(11):1584-1589.
- [3]吴杨帆,吴萌岭,田春,等.多工况融合电机械制动关键部件疲劳寿命分析[J].机电工程技术,2022,51(04):60-64.
- [4]崔海涛,钱春华.镍基高温合金的热机械疲劳寿命预测模型研究[J].中国机械工程,2024,35(01):67-73+82.