

机械材料的疲劳性能与强度分析在设计中的应用

崔晓玉 周润猛

青岛城市学院 山东青岛 266106

摘要: 机械结构在长期使用下容易产生疲劳损伤,材料的疲劳性能和强度对结构的安全性以及使用寿命起着关键作用,因此对其影响因素与分析方法进行研究,对于工程的设计具有重要的指导意义。文章系统分析了机械材料的疲劳特性以及强度分析原理;研究了材料性能、组织结构、载荷类型、表面状态和加工质量对疲劳性能的影响;整理了静力强度计算、疲劳强度评价、断裂力学分析方法;提出了在设计中通过合理选材、优化结构布局、控制载荷、改善加工工艺来提高材料耐久性、可靠性的应用途径。

关键词: 疲劳性能;材料强度;设计应用

引言

随着机械工业的发展,结构件在复杂的工况下长期工作,其安全性和可靠性成为设计的重要指标。机械材料在循环载荷作用下很容易产生疲劳破坏,强度分析不但关系到材料的承载能力,也直接影响结构寿命和使用效率^[1]。因此,开展材料的疲劳性能和强度分析方法研究,对改进结构设计、提高设备的安全性与经济性有着十分重要的意义。在总结了疲劳特性及强度分析理论之后,联系材料性能、载荷情况、加工工艺等影响因素,给出面向工程设计的分析与应用途径,从而为改善机械结构耐久性给予理论与操作上的参照。

1 疲劳性能与强度的基础理论

1.1 机械材料疲劳特性

机械材料的疲劳特性是指材料在长期交变应力或应变作用下产生裂纹、变形、破坏的能力,它与材料的化学成分、晶体结构有关,也与材料的微观缺陷、晶界分布、热处理工艺有关。实际上,材料在承受的应力小于其静态强度时,会出现几千到数百万次的循环疲劳破坏,这就说明了疲劳寿命的预测是很有必要的。疲劳特性具有明显的非线性、不确定性,裂纹萌生阶段是缓慢的,很难察觉;而裂纹扩展阶段又是迅速的、不可逆的,表现出高度的随机性、复杂性。

1.2 材料强度分析原理

强度是评价材料在外力作用下抵抗破坏和塑性变形的的主要标准,它体现的是材料承载能力的极限,也是结构在复杂荷载下所具有的安全裕度。材料的抗拉、抗压、抗弯、抗

剪和抗扭等力学性能共同组成了它的强度特性,而这些性能又受材料内部组织结构、缺陷分布、晶粒尺寸和加工工艺等因素的影响。强度分析时,工程师要兼顾静力条件和动力载荷,还要考虑温度环境和应力集中现象;理论计算加上试验数据和数值模拟,才能对材料的承载能力做全面的评价。

2 机械材料疲劳性能的关键影响因素

2.1 材料性能与组织结构

材料的疲劳性能很大程度上由材料本身以及微观组织结构所决定。化学成分、晶体结构、晶粒大小、相分布、缺陷类型等一起决定材料在循环载荷下应力响应及裂纹萌生的行为。高强度钢、铝合金、钛合金在相同的载荷下疲劳寿命相差数倍,这不仅与本征强度有关,还与微观组织的均匀性有关。另外,热处理工艺如淬火、回火或时效处理,都会对材料的硬度、韧性产生明显的影响。

2.2 载荷类型与作用条件

循环载荷、冲击载荷、混合载荷对材料的疲劳行为影响是不一样的。载荷幅值、频率、波形、作用方向等都会改变裂纹产生位置和扩展速度。交变弯曲载荷会在表面产生小裂纹,多轴复合载荷会让内部裂纹提前形成。环境条件,温度、湿度、腐蚀介质等都会与载荷一起对疲劳性能产生作用,造成疲劳性能高度非线性、不可预测。工程设计时,准确模拟实际服役载荷,再结合实验数据和数值分析方法,就能较好地评价材料在各种条件下的疲劳寿命,给结构安全提供可靠依据。

表 1 不同载荷类型对材料疲劳性能的影响

载荷类型	典型应用	对疲劳性能影响
交变载荷	飞机机翼、桥梁	裂纹易在表面萌生，寿命受幅值影响
冲击载荷	机械冲压、齿轮啮合	局部瞬时应力高，易产生微裂纹
混合载荷	船舶、汽车底盘	多方向应力作用，加速疲劳损伤

2.3 表面状态与加工质量

材料表面状态以及加工工艺对于疲劳性能起着决定性的作用。粗糙表面、残余应力集中、加工缺陷等都是裂纹产生的萌发点；精细加工、表面强化等都可以提高疲劳寿命。由于不同的加工方法所造成的残余应力分布以及表面微观结构的不同，同一个零件或者不同批次的同一零件会表现出完全不同的疲劳性能。表面涂层、防腐处理可以改善表面光洁度，也能在高温、高湿、腐蚀的环境下减缓裂纹的扩展。

表 2 表面处理对疲劳性能的提升效果

表面处理方法	作用机制	疲劳性能提升效果
喷丸处理	引入压应力，闭合微裂纹	可提高 10%~30% 寿命
滚压加工	改善表面粗糙度和残余应力	提升耐疲劳能力，降低裂纹萌生
抛光/涂层处理	减少应力集中和腐蚀影响	延缓裂纹扩展，增加寿命

3 机械材料强度分析的主要方法

3.1 静力强度计算方法

静力强度计算方法以材料在恒定载荷作用下的力学响应为基础，经由分析应力分布、应变情况及结构几何特征来评估承载能力。此方法一般结合理论力学、有限元分析、实验验证来预测材料或者结构在极限载荷下发生破坏的风险。尽管静力分析假设载荷恒定，但是实际工程中仍然可以为设计初期的安全评定提供直观的依据。另外，考虑应力集中、边界条件、几何缺陷等进行静力计算，可以发现潜在的薄弱环节，为后面疲劳设计、寿命预测打下基础。

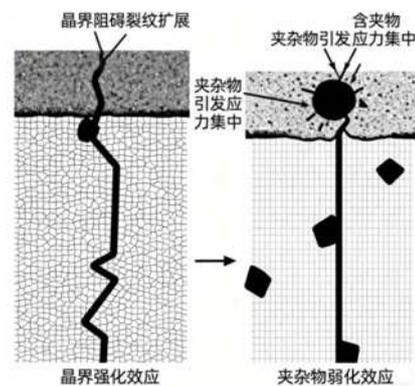
3.2 疲劳强度评估方法

疲劳强度评价方法以材料在循环载荷作用下表现出的性能为研究对象，重视应力幅、循环次数、裂纹萌生和扩展规律的综合分析。S-N 曲线、应力寿命法、应变寿命法等可以用来预测材料的寿命；矿山规则和损伤累积理论可以用来帮助工程师应对复杂的、多变的载荷历史^[2]。该方法除了要考虑材料本身的性质外，还要考虑实际工况。

3.3 断裂力学分析方法

断裂力学分析的方法把裂纹的存在和发展当作中心，重视材料由微裂纹产生到宏观断裂的全过程。用应力强度因

子、断裂韧性、能量释放率这些参数来描述，就能定量地说明裂纹在不同载荷、环境、温度条件下是怎样发展的。该方法关注的是材料的微观结构，晶界、夹杂物、残余应力等都会影响到裂纹的扩展；有限元模拟和实验观察相结合，可以准确地计算出复杂结构中局部应力集中处^[3]。


图 1 断层与应力应变地质示意图

图 2 晶界迁移与合金元素作用图

4 机械材料疲劳性能与强度分析在设计中的应用路径

4.1 合理选材，优化结构布局

材料选择在工程设计中占有十分重要的位置，它所涉及的不仅仅只是承载能力的问题，而且还直接影响到产品的疲劳寿命，可靠性和成本效益。面对复杂的服役环境，设计师要从材料的本征性能着手，兼顾抗拉强度、抗压强度、疲劳极限等各个方面。高循环应力条件下，应选用疲劳极限高、韧性好或者轻质高强度铝合金；根据使用条件、温度环境、湿度、腐蚀介质进行材料匹配。在复杂的结构中，各个零部件所受的力的特点、疲劳敏感性存在着较大的差别，因此材料的分配要遵循局部加强、整体改善的原则。

结构布局优化应按载荷传递顺畅、应力分布均匀、应力集中最小化的原则，使材料性能得到最大化的利用。梁、板、壳体结构上可以增加肋板，合理布置加强筋或者采用渐

变截面来分散应力集中,降低局部疲劳破坏的可能性。连接形式上,螺栓、铆钉和焊接等传统连接方式要考虑到应力集中和焊缝残余应力的影响,可以采用增加过渡圆角、优化孔位间距等手段来改善应力分布。另外对于发动机缸体、传动系统等复杂的机械结构,也可以采用拓扑优化与轻量化设计的方法,把材料用在受力最大的地方,从而在保证结构强度、疲劳性能的基础上,实现节约材料的目的。

4.2 控制载荷,提升使用寿命

机械结构在服役时所承受的载荷大小、方向、分布等,决定着它的疲劳寿命与强度。在实际工程中,载荷往往是多轴、交变甚至是随机的,因此材料疲劳行为高度非线性、不可预测。为了提高寿命,在设计阶段就要对零部件的受力状态进行充分分析,利用有限元分析、应力应变模拟、多体动力学仿真等准确找到高应力集中区;再根据载荷幅值、频率、循环次数等对局部结构进行加强。承受冲击载荷的结构上,可以采用增加弹性缓冲、阻尼机构或渐进加载的方式减小瞬时应力。

实际应用中载荷控制还要建立动态监测和反馈机制。依靠传感器和智能监测系统,可以随时得到应力,振动,温度的数据,剖析载荷历史曲线,找出危险点。桥梁、风力发电机叶片、高铁轮轴等结构上可以利用在线载荷监控系统调节运营参数,进行维护周期的优化。另外在机械系统的设计中,载荷路径的优化、载荷重分配以及应力缓释措施也不容忽视。利用拓扑优化及力学仿真,将高应力区合理转移到强度较高的材料区或者增加受力冗余,可有效地减小局部的疲劳累积。

4.3 改善加工,提高表面质量

表面质量对机械材料的疲劳性能影响很大,因为裂纹一般从表面的微小缺陷开始产生。因此在零件的制造和装配过程中,要对加工工艺加以严格控制。精密车削、磨削、抛光可以减小表面粗糙度,也可以改善残余应力分布。对于高强度零件,采用喷丸强化或滚压处理能够在零件表面形成均匀的压应力场,推迟裂纹的产生;在焊接、铸造、锻造件上,消除应力集中、改善焊缝的形状、后续热处理,都可以提高零件表面及近表面的抗疲劳能力^[4]。材料表面化学处理,如

阳极氧化、镀层或氮化等工艺,不仅可以提高耐磨性,还可以提高在腐蚀环境中疲劳寿命。

在实际应用中,应该将表面改善与设计、载荷控制和材料选择结合起来,实现全链条疲劳寿命的提高。在设计阶段可对关键受力部位做表面敏感性分析,利用有限元模拟找出可能产生应力集中处,对加工精度提出量化要求。其次在加工阶段采用分级抛光、精密切削、强化处理等方式对表面粗糙度、残余应力、微观缺陷进行控制;对高疲劳敏感部位采用多工艺叠加的方式,即滚压+喷丸+表面涂层,形成复合保护层。最后,在运行阶段采用表面状态监测技术,可及时发现微小缺陷并修复或替换。

5 结语

材料疲劳损伤是工程领域里十分重要的一个研究方向,它牵涉到产品的安全性、可靠性和使用寿命。随着科技的发展、工业的进步,社会各界对于材料疲劳损伤预测的准确度也提出了越来越高的要求。通过对机械材料的疲劳特性、强度规律及其影响因素进行系统的分析,利用静力计算、疲劳评估、断裂力学的方法,可以给工程设计提供科学的依据。合理选材、改善结构、控制载荷和提高加工质量等措施的采用,有益于增长结构的使用寿命,改进安全性能。

参考文献:

- [1] 罗德林. 起重机械金属结构疲劳寿命分析探讨 [J]. 中国科技论文在线精品论文, 2025,18(02):90-92.
- [2] 潘云. 机器学习在材料疲劳损伤预测中的应用 [J]. 机械管理开发, 2025,40(10):258-260+264.
- [3] 王利东. 机械工程中金属材料的疲劳与断裂分析 [J]. 产品可靠性报告, 2024,(06):117-118.
- [4] 梁乐乐, 杨胜春, 宋贵宾, 等. 复合材料机械连接强度分析研究 [J]. 塑料工业, 2022, 50 (03): 90-94.

作者简介:

崔晓玉(1985—),男,汉族,山东潍坊高密,本科,实验师,研究方向:机械设计制造及自动化。

周润猛(1998—),男,汉族,山东省青岛市,硕士研究生,助教,研究方向:机电一体化设计,机械结构设计。