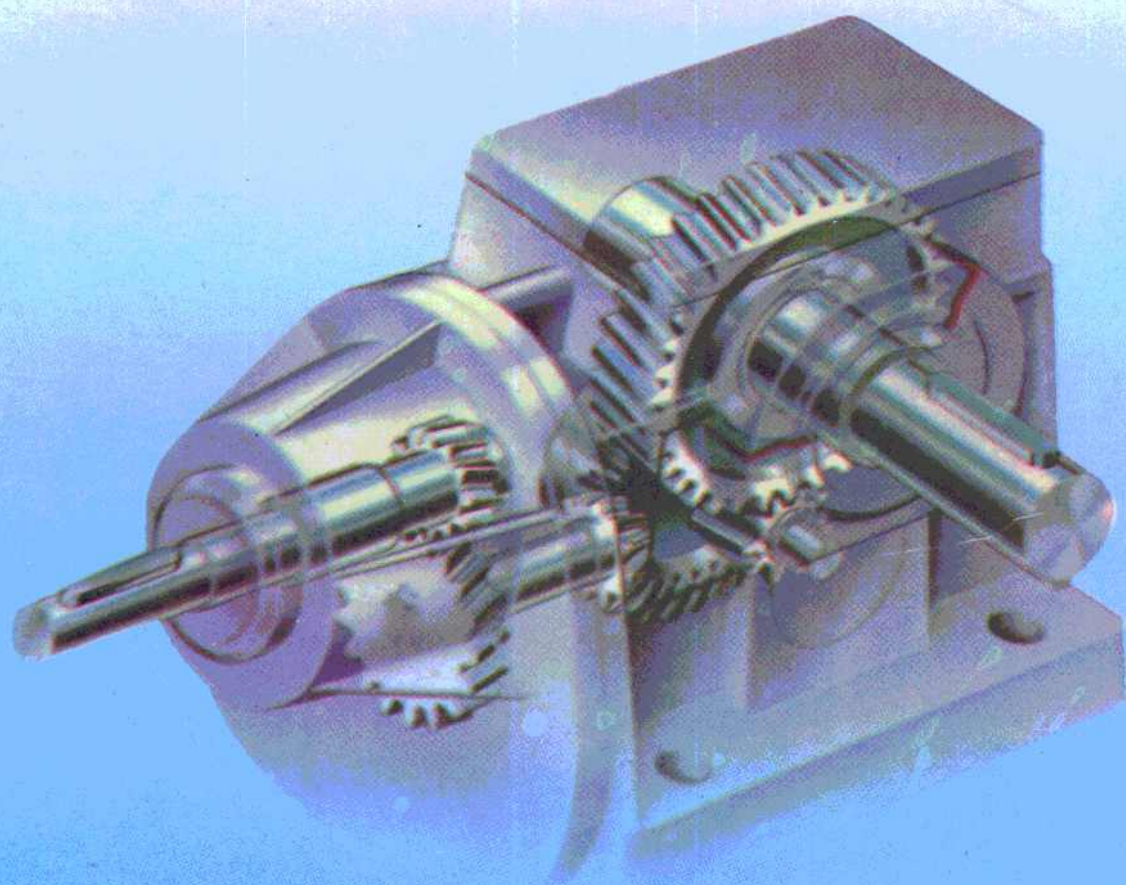


高等学校机械类系列教材

机 械 设 计

何小柏 主编



机 械 设 计

何小柏 主编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书是根据国家教委 1992 年批准发布的《高等学校工程专科机械设计课程教学基本要求》,结合我国工科院校机械类专科培养目标编写的。

全书除绪论外分为五篇 18 章,计有:机械零件设计概述,机械零件的强度,摩擦、磨损及润滑概述,螺纹联接,轴毂联接,铆接、焊接和粘接,带传动,链传动,齿轮传动,蜗杆传动,螺旋传动,摩擦轮传动与无级变速器,轴,滑动轴承,滚动轴承,联轴器和离合器,减速器,弹簧等内容。各章均有适量的思考题、习题及例题,以利学生复习和自学。

本书为大学工科机械类专业专科(三年制,72~81 学时)教材,也可作为近机类本科和成人机械类专科各专业的教学用书,亦可供广大工程技术人员参考。

机 械 设 计

何小柏 主编

责任编辑 蒋怒安

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆后勤工程学院印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:15.5 字数:386 千 插页:1

1995 年 7 月第 1 版

1998 年 7 月第 3 次印刷

印数:10001~15000

ISBN 7-5624-0976-5 /TH·48 定价:16.00 元

前 言

本书是根据国家教育委员会 1992 年批准发布的《高等学校工程专科机械设计课程教学基本要求》编写的。适于 72~81 学时的机械类专业使用。是工科院校专科系列教材之一。

在编写过程中,针对高等学校工程专科教育培养应用型高级技术人材的目标和要求,注意精选教材内容,既保证基础理论部分的“必需”和“够用”,又突出“应用”,加强工程实际应用性内容,强调培养学生运用基本理论解决工程实际问题的能力,并注意为后继课程打好基础。同时,尽可能引用最新国家标准,在教材中有关标准、规范、数据、资料等均以阐明问题为原则精简摘录,详细的数据及综合性设计资料等可查阅有关资料。

本书由何小柏担任主编,由蒋学全、陶金玉、李治中、游理华担任副主编。参加本书编写的有:重庆大学何小柏(绪论、第三章),陕西工学院蒋学全(第十章、第十六章),宁夏工学院陶金玉(第十五章),四川工业学院李治中(第九章、第十七章、第十八章),云南工业大学姚祥云(第五章、第十三章),四川轻化工学院李开世(第四章、第十一章),重庆大学游理华(第一章、第二章)、周立新(第十四章)、卫兴民(第七章)、龙振宇(第十二章)、姚顺培(第八章、第六章)。此外,新疆工学院庞远棣编写了第七章的部分内容。

本书由国家教育委员会高等学校机械设计课程教学指导小组副组长、清华大学吴宗泽教授主审,并对本书的编写提出了很多宝贵的意见和建议;各主、参编学校的领导对本书的出版给予了大力支持;此外,重庆大学史仲民、蒋竟成、李俊等参与了审查和校对工作,在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,误漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

1994 年 11 月 8 日

第一篇 机械设计和计算基础

第一章 机械设计概述

§ 1-1 机器应满足的基本要求

机械零件是组成机器的基本单元。要解决机械零件的设计问题,必须对机器的基本要求有所了解。这些基本要求是:

一、实现预期功能 机器应满足在预定工作期限内和预定环境条件下可靠地工作,实现预期的功能。

二、经济性 经济性是一项综合性指标。它要求设计和制造机器的周期短、成本低,使用机器时生产率高,效率高,能源和材料消耗少,维护管理费用低。

三、操作方便与安全 机器的操作应轻便省力,符合人体工程学要求。要保证工人操作安全。对可能危及工人安全的机器部位,应设有各种防护装置及安全措施。对误操作,应有连锁装置和保险装置。

四、造型美观和减少环境污染 机器的外观造型和色彩应协调、大方,符合工业美学要求,以美化工作环境。要尽可能减少机器振动,降低噪音,减轻对环境的污染。

五、其它要求 对不同的机器,还有一些为该机器所特有的要求。如大型机器应便于起重、运输,食品机器应能保持产品清洁等。

§ 1-2 机械零件设计的基本要求和一般步骤

一、机械零件设计的基本要求

对机械零件的基本要求是可靠性和经济性。可靠性是指机械零件在预定的期间内能安全可靠地工作。可靠性要求是针对零件的失效而言。零件的失效形式主要反映在强度、刚度、寿命、耐热性和振动稳定性等方面。因此,要求机械零件在这些方面必须满足一定的条件。经济性是指零件的成本应低廉。这就要从设计和制造两方面入手,设计时应正确选择零件的材料和热处理工艺、结构尺寸、精度等级,合理制定技术条件和有关的制造方法等。还应尽可能选用标准零件。

二、机械零件设计的一般步骤

1. 根据机器的整体设计方案和零件在整机中所起的作用,选择零件的类型和结构。
2. 根据零件的工作情况,建立力学模型,进行受力分析,确定公称载荷和计算载荷。
3. 分析零件可能出现的失效形式,确定相应的工作能力计算准则。
4. 根据零件的失效形式,选用合适的材料、热处理工艺或其它处理工艺。
5. 进行零件的应力和变形计算,按零件的工作能力计算准则确定零件的主要尺寸,并对其

标准化或圆整。

6. 根据零件的主要尺寸和结构、工艺要求等绘制零件工作图,编写计算说明书。

§ 1-3 机械零件的主要失效形式

机械零件由于某些原因而不能正常工作,称为失效。常见的失效形式有以下几种。

一、断裂

断裂分为脆性断裂、韧性断裂和疲劳断裂。脆性断裂多发生于脆性材料;韧性断裂多发生于塑性材料。当零件剖面上的应力超过零件的强度极限时,即发生这两类断裂。疲劳断裂是零件在重复的循环变应力作用下,工作较长时间后发生的断裂。大多数机械零件的断裂均属于疲劳断裂。

二、过量变形

机械零件在工作过程中,受外载作用发生弹性变形。当弹性变形量太大时,零件或机器将不能正常工作,严重时还能损坏机器。在严重过载的情况下,零件还会发生塑性变形。塑性变形将影响零件的形状和尺寸,致使零件或机器丧失工作能力。

三、表面失效

表面失效常发生在零件相互联接处的接触表面。载荷作用于相互运动的表面,会引起摩擦磨损。此外,环境介质包围着零件表面,可能引起腐蚀。所以,表面失效是一种常见的失效形式。

表面失效包括:疲劳点蚀、磨损、胶合、塑性变形、压溃及腐蚀等。

由于表面失效,摩擦磨损增大,能量损耗增加,零件表面形状和尺寸发生变化,最终导致零件报废。

四、破坏正常工作条件引起的失效

有些机械零件在一定的工作条件下才能正常工作,如果工作条件改变,则会引起失效。例如,依靠摩擦传力的带传动和摩擦轮传动,只有在它们所传递的有效圆周力小于临界摩擦力的情况下才能正常工作;一旦所传递的有效圆周力超过临界摩擦力,就会发生打滑失效;液体摩擦滑动轴承,如果润滑油膜破裂,就会出现过热、胶合和磨损等形式的失效等。

§ 1-4 机械零件的计算准则

机械零件抵抗失效的安全工作限度称为机械零件的工作能力。对载荷而言,工作能力就是承载能力,绝大多数零件的工作能力都取决于承载能力。有时,也有一些零件的工作能力取决于温度、速度、压力、变形等的限制。同一个机械零件,可能存在好几种失效形式,因而也就存在不同的工作能力。例如,轴的工作能力既指承载能力,又指轴的转速限制。在这些不同的工作能力中,起决定作用的将是最小的工作能力。为了保证零件在预定的寿命期内可靠地工作,就必须对它的强度、刚度、寿命、温升和振动等方面的工作能力进行计算。

机械零件工作能力的判定条件称为机械零件的计算准则。主要有：

一、强度准则

强度是指零件在载荷作用下抵抗断裂、塑性变形和某些表面失效的能力，是衡量机械零件工作能力最基本的计算准则。强度准则可表示为

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-1)$$

或

$$S \geq [S] \quad (1-2)$$

式中 σ ——载荷作用下零件危险截面或工作表面的最大应力；

$[\sigma]$ ——零件的许用应力；

S ——零件工作时的计算安全系数；

$[S]$ ——零件的许用安全系数。

二、刚度准则

刚度是零件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力。刚度越小，则零件发生过量变形的可能性越大。刚度准则为

$$y \leq [y] \quad (1-3)$$

式中 y ——零件在载荷作用下产生的广义弹性变形量，它可以是位移、转角、扭转角等任何形式的弹性变形量；

$[y]$ ——许用变形量。

三、寿命准则

影响寿命的因素很多，这里仅对疲劳、磨损、腐蚀等主要的几种略作介绍。

疲劳失效指疲劳断裂和疲劳点蚀。零件抵抗疲劳失效的能力称为疲劳强度。

磨损是零件失效的主要形式。零件抵抗磨损的能力称作耐磨性。要提高零件的耐磨性，必须在设计时运用摩擦学的理论来确定零件的结构、选择摩擦副材料、热处理工艺、表面状态和油品等，并在使用中始终保持良好的润滑。

腐蚀寿命目前尚无计算方法。提高材料防腐能力的主要措施是选用耐腐蚀材料或采用各种防腐蚀的表面保护。

四、振动稳定性准则

机器中存在很多周期性变化的激振源，如齿轮的啮合、弹性轴的偏心转动等。如果零件的固有频率和上述激振源的激振频率相重合或成整数倍关系时，零件将发生共振。此时，零件的振幅急剧增大，零件在短期内将遭到破坏。因此，设计时要使受激振作用的各零件的固有频率与激振源的频率相错开。

五、散热性准则

当两相互运动表面发生剧烈摩擦时，会产生很大的热量，使油的粘度和油性降低而破坏正常润滑。在高温作用下相互运动的表层金属接触处将产生胶合。因此，要对发热量大的零件

(如蜗轮、滑动轴承等)进行热平衡计算,以防止零件的工作温度超过许用工作温度。

§ 1-5 机械零件的材料选择

机械零件的材料有:金属材料、非金属材料和复合材料。金属材料分为黑色金属材料 和有色金属材料。黑色金属材料包括各种钢、铸钢和铸铁。有色金属材料包括铜合金、铝合金、轴承合金等。非金属材料指塑料、橡胶、陶瓷等。复合材料是用两种或两种以上的材料经复合工艺处理而得到所需性能的一种新型材料。例如用玻璃、石墨(碳)、硼、塑料等非金属材料可以复合成各种纤维增强复合材料。在普通碳素钢板表面贴复塑料,可以获得强度高而又耐腐蚀的塑料复合钢板等。

选择机械零件材料的原则是:所需材料应满足零件的使用要求、有良好的工艺性和经济性等。

一、使用要求

机械零件的使用要求表现为:(1)零件的工作情况和受载情况,以及为避免相应的失效形式提出的要求;(2)对零件尺寸和重量的限制;(3)零件在整机或部件中的重要程度。这些要求,通过合理选择材料的机械性能、物理性能和化学性能来满足。对表面受较大接触应力的零件,应选择可以进行表面处理的材料如表面硬化钢;对受变应力的零件,应选择耐疲劳的材料;对于受冲击载荷的零件,应选择冲击韧性较高的材料;对于尺寸取决于强度而尺寸和重量又受限的零件,应选择强度较高的材料;对于尺寸取决于刚度的零件,应选用弹性模量较大的材料;在滑动摩擦下工作的零件,应选用减摩和耐磨性能好的材料;对于在高温下工作的零件,应选用耐热材料;在腐蚀介质中工作的零件,应选用耐腐蚀的材料等。

二、工艺要求

要考虑所用的材料,从毛坯到成品都能方便地制造出来。例如,结构复杂、尺寸较大的零件难以锻造,可以采用铸造或焊接。

根据所选的工艺,要考虑材料对该工艺的加工可能性。对于铸造,要考虑材料的液态流动性、产生缩孔和偏析的可能性等;对于焊接,要考虑材料的可焊性和产生裂纹的倾向等;对于锻造,要考虑材料的延伸性、热脆性和变形能力等;对于需经热处理的零件,要考虑材料的可淬性、淬火变形的倾向性和淬透性等;对于需经切削加工的零件,要考虑材料的硬度、易切削性、冷作硬化程度和切削后能达到的表面粗糙度等。

三、经济要求

1. 材料本身的相对价格 在满足使用要求的前提下,应尽量选用价格低廉的材料。这一点,对于大批量制造的零件尤其重要。

2. 材料的加工费用 尽管铸铁比钢板价廉,但对于某些单件或小批量生产的箱体类零件,采用铸铁反而比采用钢板焊接的成本更高,因为后者可以省掉模型的制造费用。

3. 材料的利用率 采用无切屑或少切屑加工,如模锻、精铸、冲压等,可以提高材料的利用率。

4. 局部增强法 对零件有不同要求的部位采用不同的材料。例如,火车车轮采用一般材料的轮芯外部热套一个硬度高而耐磨的轮箍;蜗轮采用铸铁轮芯外套青铜齿圈等。

5. 材料代用 由于供应上的原因或经济性的要求,可以对所选材料用其它材料代用。例如,当强度为主要要求时,可选用强度较高而价格较贵的材料,也可用强度较差而价廉的材料代替,而将结构尺寸适当加大;当耐磨或耐腐蚀为主要要求时,可以不选用耐磨性或防腐性好的材料,而选用较差的材料进行各种表面硬化处理或防腐处理;对稀有材料,也可以用普通材料代替,例如,用铝青铜代替锡青铜制造轴承等。

6. 材料供应情况 从简化材料品种的供应和储存出发,对于小批量生产的零件,应尽可能减少同一台机器上使用材料的品种和规格。

§ 1-6 机械零件的工艺性和标准化

一、工艺性

先进的设计要由先进的工艺来保证。要大力发展工艺,以提高设计水平。设计要尽量结合本企业的实际,采用良好的工艺。良好的工艺是指所设计的机械零件能用最短的时间、最少的劳动量、最低的制造费用生产出来,且装拆、维修方便。对工艺的基本要求有以下几方面。

1. 零件的结构与生产条件和规模相适应 单件或小批量生产的零件,应充分利用现有的生产条件。如直径大于 600mm 的齿轮毛坯,用一般的锻压设备难以锻造,应采用铸件或焊接件。如果没有磨齿机床,就不要采用齿面硬度高、热处理变形大的热处理方法。

2. 毛坯选择合理 零件的毛坯可以是铸件、锻件、轧制件、焊接件和冲压件等。毛坯的选择应考虑生产批量大小、材料性能和加工性能等。如对锻件而言,单件或小批量生产宜用自由锻,大批量生产宜用模锻。

3. 结构和形状应简单合理 零件的结构和形状越复杂,制造、装配和维修就越困难,成本也就越高。因此,要尽可能采用简单的圆柱面、平面、共轭曲面及其组合;尽量减少被加工面的数目和被加工面的面积;尽量采用相同尺寸(直径、圆角半径、配合尺寸和公差、螺纹的直径、线数和螺距、齿轮模数等)。

4. 规定合理的制造精度和表面粗糙度 制造精度过高、表面粗糙度过低,都会明显增加机械零件的制造成本。因此,在满足使用要求的前提下,应尽可能降低制造精度、增大表面粗糙度。

5. 考虑装拆的工艺性 设计中,应考虑零件能便于装配、拆卸并尽可能减少装拆的工作量。还应考虑搬运、安装、使用、维修的方便性和经济性。

二、标准化

零件标准化是通过对零件的尺寸、结构要素、材料性能、检验方法、设计方法、制图要求等制定出各式各样的标准,供设计者共同遵守。与零件标准化密切相关的是部件的通用化。通用化是最大限度地减少和合并产品的型式、尺寸和材料的品种,使零件和部件尽量在不同规格的同类产品乃至不同类产品上通用。产品系列化是将尺寸和结构拟订出一定数量的原始模型,然后根据需求,按照一定的规律优化组合成产品系列。

零件标准化、部件通用化和产品系列化被统称为“三化”。“三化”的优越性表现在:(1)减少设计工作量;(2)便于安排专门厂家采用先进技术进行专业化大生产,保证产品质量,并能大幅度降低劳动量、材料消耗和制造成本;(3)技术条件和检验、试验方法的标准化,可以改进和提高机械零件的质量;(4)增大互换性,便于维修。

我国现已颁布的与机械设计有关的标准,可以分为国家标准(GB)、部颁标准(如 JB、YB 等)、专业标准和企业标准四级。我国已加入国际标准化组织(ISO),许多新的国家标准已采用了相应的国际标准。设计时,应执行和采用各项标准。

§ 1-7 机械设计方法的新发展

机械设计目前正处在由传统设计方法到现代设计方法的发展过程。由于采用现代设计方法如计算机辅助设计、优化设计、可靠性设计和设计方法学等,使机械设计在设计质量和设计速度方面有了很大的发展与提高。

一、计算机辅助设计

计算机辅助设计(Computer Aided Design,简称为 CAD)是利用计算机来辅助设计人员完成计算和绘图及其它作业的一种设计方法。在交互式计算机辅助设计中,设计人员可以通过人机对话对设计方案进行反复修改。计算机辅助设计显著地减少了手工计算和绘图工作量,提高了设计效率,缩短了设计周期,且便于多方案优选。

二、优化设计

优化设计(Optimum Design)是最优化数学原理在机械设计中的应用。利用计算机和优化理论,在满足约束条件的前提下,寻求使某一项或某几项设计指标达到最佳值的设计方案。

对于简单的设计问题,其设计方案有限,可以用试算法作几个设计方案进行比较,从中选择较好的设计方案。对于单变量的设计问题,可以用求导数的方法来确定极大值或极小值,从而获得最佳设计方案。但是,对于复杂的多变量设计问题,可能存在的设计方案很多乃至无限,不可能凭经验或试算从中找出最佳方案,只有按照优化理论,利用计算机高速运算的特点,从众多的设计方案中找出最佳的设计方案。

三、可靠性设计

可靠性设计是以概率论和数理统计为基础,以失效分析、失效预测及各种可靠性试验数据为依据,以保证产品可靠性为目标的设计方法。在常规的机械设计中,材料的机械性能等影响设计方案的参数通常是以均值等确定量给出的。事实上,由于材料、工艺、结构和使用等随机因素的影响,这些参数并不是一个确定的值,从而使机械零件的应力、强度和寿命都呈现一定的统计分布状态。考虑这种统计分布状态的设计,比常规设计更加符合工程实际。

此外,工业艺术造型设计、设计方法学等都是目前推广应用的机械设计新方法,对提高设计水平有重要意义。

思 考 题

- 1-1 机器应满足的基本要求有哪些?
- 1-2 对机械零件设计的基本要求是什么?
- 1-3 机械零件设计的一般步骤有哪些?
- 1-4 机械零件有哪些主要失效形式?
- 1-5 机械零件的计算准则有哪些?
- 1-6 机械零件材料的选择原则是什么?
- 1-7 对机械零件工艺性的基本要求有哪些?
- 1-8 何谓“三化”,其意义如何?

第二章 机械零件的强度

§ 2-1 载荷和应力的分类

一、载荷的分类

作用在机械零件上的载荷通常分为静载荷和变载荷两大类。静载荷是指大小、作用位置和方向不随时间变化或变化缓慢的载荷,如锅炉压力。变载荷是指大小、作用位置或方向随时间变化的载荷,如曲柄压力机的曲轴和汽车悬架弹簧等所受的载荷。

在机械设计计算中,通常把载荷分为公称载荷(或称名义载荷)和计算载荷。公称载荷是按原动机的额定功率或机器在稳定和理想工作条件下的工作阻力计算的载荷,它没有考虑载荷随时间变化而产生的不均匀性。事实上,原动机和工作机运转是否平稳、载荷在零件上的分布是否与设计计算时设定的情况相一致等,都对强度计算的精确度有很大的影响。为了考虑上述因素的综合影响,引入载荷系数对公称载荷进行修正,载荷系数 K 与公称载荷的乘积称为计算载荷。

二、应力分类

按应力随时间变化的特性不同,应力分为静应力和变应力两大类。静应力是不随时间变化或变化缓慢的应力(图 2-1a)。变应力是随时间变化的应力(图 2-1b、c、d)。

静载荷不一定产生静应力。如图 2-2 所示,转轴和滚动轴承所受的载荷均为静载荷,但转轴上 a 点和滚动轴承外圈滚道上 a 点的应力却是随时间变化的。通常,把随时间变化十分缓慢的应力(如在整个寿命期内应力变化次数低于 10^3 次)近似地当作静应力处理。

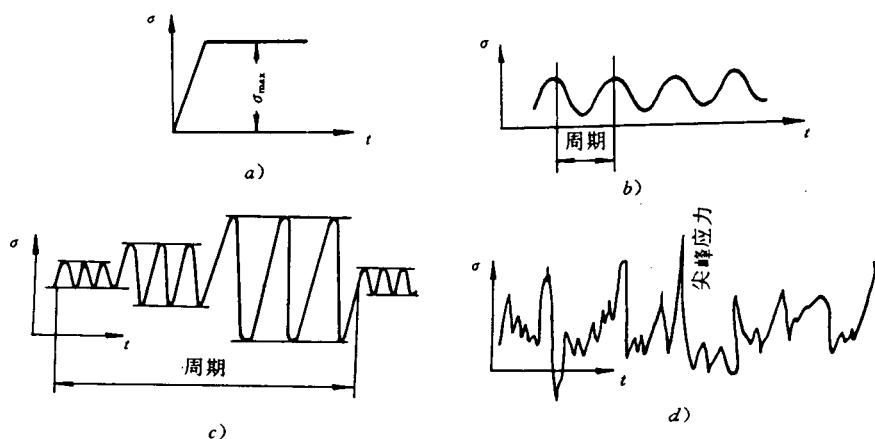


图 2-1 应力随时间的变化特性

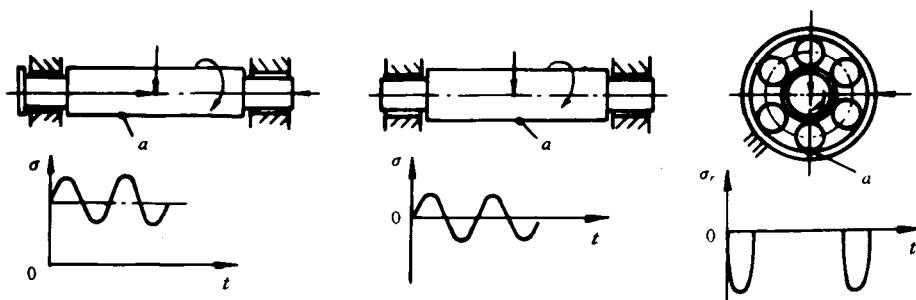


图 2-2 在静载荷作用下产生变应力的实例

变应力可以分为随机变应力和非随机变应力。随机变应力(图 2-1d)没有一定的规律可循,其变化情况完全是未知的。非随机变应力是按照一定的规律变化的应力,它可以分为稳定循环变应力(图 2-1b)和不稳定循环变应力(图 2-1c)。由瞬时作用的过载或冲击所产生的应力称为尖峰应力(图 2-1d)。

机械零件的应力,大都可以处理为稳定循环变应力。稳定循环变应力分为非对称循环变应力、脉动循环变应力和对称循环变应力(图 2-3)。

设稳定循环变应力的最大值为 $\sigma_{\max}$, 最小值为 $\sigma_{\min}$, 规定:

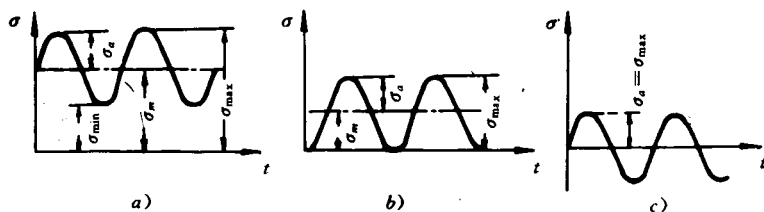


图 2-3 稳定循环变应力的类型

a) 非对称循环变应力 b) 脉动循环变应力 c) 对称循环变应力

平均应力 $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$

$$\text{应力幅 } \sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

$$\text{应力循环特性 } r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$$

静应力和三类稳定循环变应力可根据应力循环特性 r 加以区分:

1. $r = +1$ 为静应力, 其 $\sigma_a = 0, \sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \sigma_m$;
2. $r = -1$ 为对称循环变应力, 其 $\sigma_{\min} = -\sigma_{\max}, \sigma_m = 0, \sigma_a = \sigma_{\max}$;
3. $r = 0$ 为脉动循环变应力, 其 $\sigma_{\min} = 0, \sigma_m = \sigma_a = \frac{1}{2}\sigma_{\max}$;
4. r 为 0、+1、-1 以外的任意实数值为非对称循环变应力。

由于机械零件的失效形式和疲劳极限应力与应力类型有关, 因此, 在进行机械零件的材料选择和强度计算时, 应首先弄清楚机械零件所受的应力类型。

§ 2-2 机械零件的整体强度

强度是材料或机械零件抵抗外力的特性。在机械零件的强度计算中, 常用到极限应力的概念。极限应力是根据材料性质和应力类型而采用的材料的某个机械性能极限值, 记作 $\sigma_{\lim}$ 或 $\tau_{\lim}$ 。极限应力通常为材料的强度极限 σ_B (或 τ_B)、屈服极限 σ_s (或 τ_s)、疲劳极限 σ_r (或 τ_r)、蠕变极限或与应力状态有关的材料的断裂韧性等。

机械零件的整体强度又称为体积强度。按照机械零件所受的应力是静应力还是变应力, 机械零件的强度又分为静强度和疲劳强度。

一、机械零件的静强度

在静应力作用下, 机械零件的失效形式主要是断裂和塑性变形, 相应的强度条件可表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\lim}}{[S_\sigma]} \\ \tau &\leq [\tau] = \frac{\tau_{\lim}}{[S_\tau]} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中 σ, τ ——零件的最大工作应力。其中, σ 为正应力, 可由拉伸、压缩、弯曲等产生; τ 为剪切应力, 可由扭转、剪切等产生;

$[\sigma], [\tau]$ ——许用正应力、许用剪切应力;

$\sigma_{\lim}, \tau_{\lim}$ ——材料的极限正应力、极限剪切应力;

$[S_\sigma], [S_\tau]$ ——对应于正应力、剪切应力的许用安全系数。

当材料为塑性材料时, 应力值达到屈服应力, 材料就会发生塑性流动, 因此, 取 $\sigma_{\lim} = \sigma_s, \tau_{\lim} = \tau_s$ 。当材料为脆性材料时, 材料表现为脆性断裂, 故取 $\sigma_{\lim} = \sigma_B, \tau_{\lim} = \tau_B$ 。

上述强度条件也可用安全系数来表示

$$\left. \begin{aligned} S_\sigma &= \frac{\sigma_{\lim}}{\sigma} \geq [S_\sigma] \\ S_\tau &= \frac{\tau_{\lim}}{\tau} \geq [S_\tau] \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

式中 S_σ, S_τ ——对应于正应力和剪切应力的计算安全系数。

如果零件所受的应力状态为双向、三向应力状态时,需按材料力学的强度理论来计算零件的最大工作应力。

二、机械零件的疲劳强度

在变应力作用下,机械零件的主要失效形式是疲劳断裂。

疲劳断裂起因于一微小的初始裂纹。它是在变应力的重复作用下,通过各种滑移方式形成的。初始裂纹通常发生在:(1)金属晶体表面、晶界或金属内部非金属夹杂物与基体交界处;(2)金属表面机械划伤,焊接裂纹,腐蚀小坑,锻造缺陷等处;(3)材料不连续处,如横截面变化处、凹槽、缺口等有应力集中的地方。初始裂纹非常细小,肉眼很难察觉。初始裂纹形成后,裂纹尖端在剪切应力的反复作用下产生塑性变形,使裂纹扩展,直至整个断面发生断裂。

疲劳断裂的断口由光滑的疲劳发展区和粗粒状的断裂区所组成(图 2-4)。初始裂纹形成后,其尖端不断扩展,在断口上往往留下清晰的疲劳条带,称为前沿线。同时,裂纹边缘在变应力作用下反复压紧和分开,形成光滑的疲劳发展区。当裂纹达到临界尺寸,在经历很少的应力循环次数后,即发生断裂,从而形成有粗晶状的断裂区。

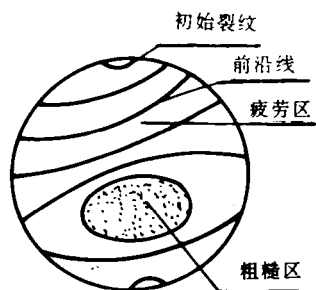


图 2-4 轴的弯曲疲劳断口

静应力作用下机械零件的失效是应力超过了它的屈服极限或强度极限,而出现很大的变形。因此,静应力作用下机械零件的失效是可以发现和避免的。与之相反,疲劳失效时零件的最大应力远低于它的屈服应力或强度极限,没有明显的变形发生。因此,疲劳断裂没有预兆,难以避免,比静应力下零件的失效更加危险,应给予高度重视。

1. 疲劳极限

对任一给定的应力循环特性,当应力循环 N 次后,材料不发生疲劳破坏的最大应力称为疲劳极限,以 $\sigma_{r,N}$ 表示。

以 N 或 $\lg N$ 为横坐标, $\sigma_{r,N}$ 或 $\lg \sigma_{r,N}$ 为纵坐标,把表示 $\sigma_{r,N}$ 和 N 的关系曲线称为疲劳曲线或 $\sigma-N$ 曲线(图 2-5)。

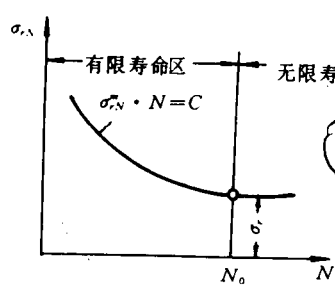


图 2-5 疲劳曲线

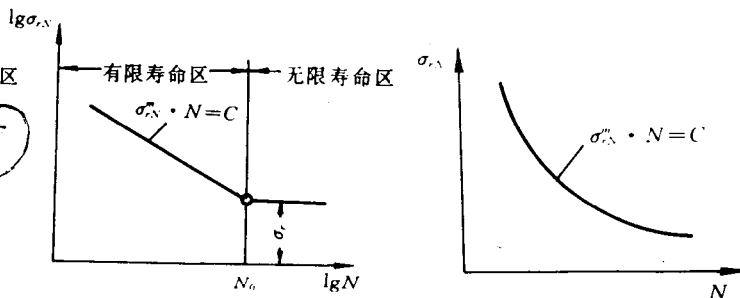


图 2-6 无水平部分的疲劳曲线

金属材料的疲劳曲线可分为如下两类:对于大多数黑色金属及其合金,当应力循环次数 N 高于某一数值 N_0 后,疲劳曲线呈现为水平直线(图 2-5);而对有色合金和高硬度合金钢,无论 N 值多大,疲劳曲线也不存在水平部分(图 2-6)。 N_0 称为应力循环基数,它随材料不同而有

不同的数值。强度愈高的钢, N_0 值愈大。通常, 对 $HBS \leq 350$ 的钢, $N_0 \approx 10^7$; 对 $HBS > 350$ 的钢, $N_0 \approx 25 \times 10^7$ 。

有明显水平部分的疲劳曲线可以分为两个区域: $N < N_0$ 的部分称为有限寿命区, $N \geq N_0$ 的部分称为无限寿命区。有限寿命区应力循环次数和疲劳极限之间的关系可用下列方程表示

$$\sigma_{rN}^m \cdot N = C \quad (2-3)$$

式中 C ——材料常数;

m ——随应力状态不同的特性系数。对受弯钢制零件, $m=9$ 。

相应于应力循环基数 N_0 的疲劳极限, 称为材料的疲劳极限, 记作 σ_r 。它同样满足

$$\sigma_r^m \cdot N_0 = \sigma_{rN}^m \cdot N = C$$

由上式解得

$$\sigma_{rN} = \sigma_r \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} = K_N \sigma_r \quad (2-4)$$

式中 $K_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}}$ ——寿命系数。

2. 极限应力图

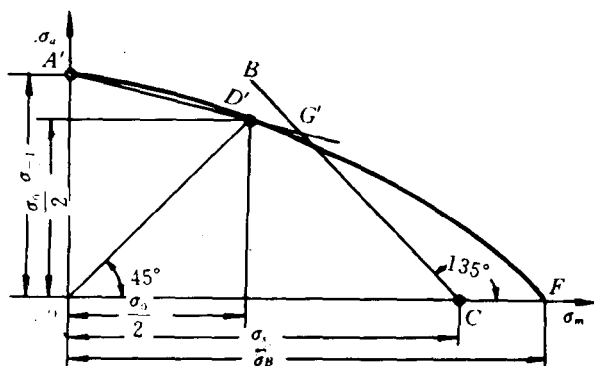


图 2-7 材料的极限应力线图

同一种材料在不同的应力循环特性 r 下, 有不同的疲劳极限 σ_r 。由于应力循环特性 $r = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$, 疲劳极限 $\sigma_r = \sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$, 因此, 可以用 $\sigma_a - \sigma_m$ 坐标系来描述应力循环特性 r 和疲劳极限 σ_r 之间的关系, 即以 σ_m 为横坐标, σ_a 为纵坐标, 不同 r 值下的 $\sigma_a - \sigma_m$ 关系曲线图称为极限应力图 (图 2-7)。设对称循环和脉动循环时材料的疲劳极限分别为 σ_{-1} 和 σ_0 , 则可以得到两点 $A'(0, \sigma_{-1})$ 、 $D'(\frac{\sigma_0}{2}, \frac{\sigma_0}{2})$; 对静应力情况, $\sigma_a = 0$, σ_m

$= \sigma_B$, 由此可以得到 $F(\sigma_B, 0)$ 点; 再选 $r \neq -1, +1, 0$ 的其它值作试验, 可求得相应的材料疲劳极限, 在 $\sigma_a - \sigma_m$ 坐标系中作出这些点, 并用一光滑的曲线连结, 即可得到该材料的疲劳极限应力线图, 即图 2-7 中的 $A'D'F$ 曲线。

上述疲劳极限应力图可用如下的折线来近似表达, 用一条直线把 A' 和 D' 连结起来, 再过 $C(\sigma_0, 0)$ 点作一与 σ_m 轴成 135° 的斜线, 它和 $A'D'$ 直线的交点为 G' 点, 则疲劳极限应力线图 $A'D'F$ 可以用折线 $A'G'C$ 来近似代替。由于该折线仅需 σ_{-1} 、 σ_0 和 σ_B 三个数值, 因此容易确定。同时, 它比较接近 $A'D'F$ 曲线, 能满足设计要求。折线 $A'G'C$ 被称为简化极限应力曲线。

在直线 $G'C$ 上的各点的最大应力 $\sigma'_{\max}$ 均等于屈服极限 σ_S 即:

$$\sigma'_{\max} = \sigma'_a + \sigma'_m = \sigma_S \quad (2-5)$$

在直线 $A'G'$ 上的各点, 存在下述关系

$$\frac{\sigma'_a - \sigma_{-1}}{\sigma'_m - 0} = \frac{\frac{\sigma_0}{2} - \sigma_{-1}}{\frac{\sigma_0}{2} - 0}$$

解得

$$\sigma'_a = \sigma_{-1} - \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \sigma'_m = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma'_m \quad (2-6)$$

式中, $\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}$, ψ_σ 为试件受循环弯曲应力时的材料特性, 又称为平均应力折合为应力幅的等效系数。它的大小表示材料对循环不对称性的敏感程度, 故有时也称为敏感系数。

3. 影响零件疲劳强度的因素

影响零件疲劳强度的主要因素有: 应力集中、绝对尺寸和表面状态。

(1) 应力集中对零件疲劳强度的影响

在零件的几何形状突变处(如轴径变化、键槽、孔、圆角等), 局部应力远大于名义应力, 这种现象称为应力集中。常用有效应力集中系数 k_σ 来表示其疲劳强度的降低程度。有效应力集中系数 k_σ 定义为材料、尺寸和受载情况都相同的一个无应力集中试件和一个有应力集中试件的疲劳极限的比值, 即

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{-1})_k} \quad (2-7)$$

式中, σ_{-1} 、 $(\sigma_{-1})_k$ 分别为无应力集中试件和有应力集中试件的疲劳极限。

(2) 绝对尺寸对零件疲劳强度的影响

随着零件截面尺寸的增大, 金属机械性能的不均匀性和组织上的缺陷促使疲劳裂纹扩展的不良影响更加显著。此外, 随着截面尺寸的增大, 应力梯度和加工时的冷作硬化作用降低。因此, 随着零件剖面尺寸的增大, 疲劳极限降低。常引入绝对尺寸系数 ϵ_σ 来考虑绝对尺寸的影响。 ϵ_σ 定义为

$$\epsilon_\sigma = \frac{(\sigma_{-1})_d}{(\sigma_{-1})_{d_0}} \quad (2-8)$$

式中 $(\sigma_{-1})_d$ 、 $(\sigma_{-1})_{d_0}$ 分别是直径为 d 和直径为 $d_0 = 6 \sim 10\text{mm}$ 的试件的疲劳极限。

(3) 表面质量对零件疲劳强度的影响

工件表面的质量对零件的静强度影响不大, 但对疲劳强度却有较强的影响。零件表面愈粗糙, 其疲劳极限也愈低。通常用表面质量系数 β 来表示。 β 定义为

$$\beta = \frac{(\sigma_{-1})_\beta}{(\sigma_{-1})_{\beta_0}} \quad (2-9)$$

式中 $(\sigma_{-1})_\beta$ 、 $(\sigma_{-1})_{\beta_0}$ 分别为某种表面质量下的试件和精抛光试件的疲劳极限。

试验表明, 应力集中、绝对尺寸和表面质量只对应力幅有影响, 可用综合影响系数 K_σ 或 K_r 来反映这些因素的综合影响。 K_σ 和 K_r 定义为

$$\left. \begin{aligned} K_\sigma &= \frac{k_\sigma}{\beta \epsilon_\sigma} \\ K_r &= \frac{k_r}{\beta \epsilon_r} \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

钢的强度越高, K_σ 和 K_r 之值愈大, 故对用高强度钢制造的零件, 必须特别注意减少应力

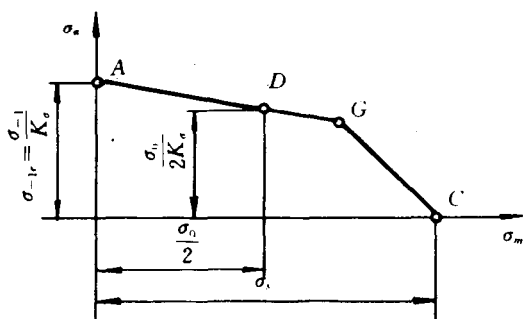


图 2-8 零件的简化极限应力线图

集中和提高表面质量。

4. 机械零件的简化极限应力图

材料的极限应力图未考虑应力集中、尺寸和表面质量的影响,而机械零件的简化极限应力图考虑了这些影响,它的确定方法与材料的简化极限应力图的确定方法相同,即找出该应力图上有代表性的三点 A、G、C(它们分别对应于材料简化极限应力图上的三点 A'、G'、C),再用直线把它们连结起来(图 2-8)。

考虑综合影响系数 K_σ 后,零件对称循环疲劳极限 σ_{-1r} 和试件对称循环疲劳极限 σ_{-1} 存在下述关系

$$\sigma_{-1r} = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma} \quad (2-11)$$

故零件简化极限应力图上 A 点的坐标为 $(0, \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma})$ 。

由于 K_σ 只对应力幅 σ_a 有影响,而对平均应力 σ_m 无影响,故简化极限应力图上代表脉动循环的 D 点的坐标为 $(\frac{\sigma_0}{2}, \frac{\sigma_0}{2K_\sigma})$ 。这样, AG 直线的方程即为

$$K_\sigma \sigma_{ae} + \psi_\sigma \sigma_{me} = \sigma_{-1} \quad (2-12)$$

式中, σ_{ae} 、 σ_{me} 分别为零件的极限应力幅和极限平均应力。

材料简化极限应力图上的 C 点是根据静强度确定的,而应力集中对静强度没有影响,故零件简化极限应力图上的 C 点仍取 $\sigma_m = \sigma_s$ 。过 C 点作与 σ_m 轴成 135° 的直线 GC, 其方程为

$$\sigma_{ae} + \sigma_{me} = \sigma_s \quad (2-13)$$

当零件受剪应力时,在上述推导中以 τ 代 σ , 同样可得

$$\text{AG 直线 } K_\tau \tau_{ae} + \psi_\tau \tau_{me} = \tau_{-1} \quad (2-14)$$

$$\text{GC 直线 } \tau_{ae} + \tau_{me} = \tau_s \quad (2-15)$$

式中, $\psi_\tau = \frac{2\tau_{-1} - \tau_0}{\tau_0} \approx 0.5\psi_\sigma$, ψ_τ 为试件受循环剪应力时的材料特性。

5. 单向稳定变应力时机械零件的疲劳强度计算

要进行机械零件的疲劳强度计算,首先要确定它的最大应力 $\sigma_{\max}$ 和最小应力 $\sigma_{\min}$, 据此确定 σ_m 和 σ_a , 并在 $\sigma_a - \sigma_m$ 坐标系中确定该点 $M(\sigma_a, \sigma_m)$ 的坐标(图 2-9)。与之相应的疲劳极限应力显然是在折线 AGC 上与 M 点具有相同应力变化规律的某点。例如,图 2-9 中 M 点表示零件的工作应力状态。如果 σ_a 和 σ_m 按曲线 1 所示的规律增长到 M 点,则极限状态为 M_0 点;如果 σ_a 和 σ_m 按直线 2 增长到 M 点,则极限状态为 M_1 点。

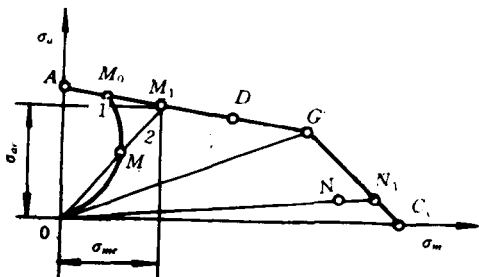


图 2-9 单向稳定变应力下的强度计算