

机械设计课程 学习·考研用书

机械设计

习题与解析

赵镇宏 尹明富 编著

Exercise

&
Analysis



清华大学出版社

机械设计习题与解析

赵镇宏 尹明富 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是重点大学的资深教授根据高等学校机械类专业机械设计课程的教学大纲的要求,结合丰富的教学经验编写而成的,通过对概念和习题的讲解与分析,帮助读者了解、掌握机械设计的原理和方法。

本书每一章内容包括:内容梳理与考点提示、专题释疑、典型例题解析、原教材习题详解、自测题及答案等5部分内容。第1部分针对学生平时学习和考研的需要,总结了各知识点的主要内容和基本概念,给出各章的基本要求、考点和难点;第2部分和第3部分对教材中较难理解的部分进行了专题论述;第4部分对于教材中的习题进行了较为详细的分析与解答,对于一些设计类型的习题,由于设计的多样性,虽没给出具体的答案,但也给出了设计的思路和步骤。本书中的例题及自测题大部分来自全国各高校历届研究生入学试题,使同学们了解各校对该门课程的要求程度和常见的考试题型。

本书是为高等院校机械类各专业本科生课程复习和考研编写的学习应试辅导书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

机械设计习题与解析/赵镇宏,尹明富编著. —北京:清华大学出版社,2007

ISBN 978-7-302-14725-1

I. 机… II. ①赵… ②尹… III. 机械设计—高等学校—教学参考资料
IV. TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第022340号

责任编辑:张楠

责任校对:刘雪莲

责任印刷:科海

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地址:北京清华大学学研大厦A座

邮编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印装者:北京科普瑞印刷有限责任公司

经销:全国新华书店

开本:185×260 印张:17.5

字数:426千字

版次:2007年5月第1版

印次:2007年5月第1次印刷

印数:1~4000

定价:28.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)82896445转8501 产品编号:023839-01

前 言

《机械设计》课程是机械工程类诸专业的主干课程之一,是培养学生机械设计能力的重要技术基础课。通过本课程的学习,可使学生了解、掌握系统的机械设计理论和方法,并具有综合运用有关课程、标准和规范等知识进行机械设计的初步能力。

本书在内容上遵循从一般到个别的原则。机械设计总论综合叙述了本课程的主要内容、性质、任务及一般机械设计的共性问题,即对机械设计与理论学科中概括水平较高的经验的论述。以后各章均论述常用的统一机械零部件。各章内容的一般顺序是:首先介绍零部件的主要类型、构造、功能、材料、制法、标准、缺点、适用场合等基本知识,以便读者对该章论述的零部件有初步的了解,为学习设计准备条件。然后论述工作情况、受力分析、应力状态、失效形式、设计准则、设计方法与步骤、参数选择原则、常用参考资料以及有关注意事项等,便于读者初步掌握零部件的设计理论与方法。机械设计总论所涉及到的基本概念、基本的方法在后续章节中以不同的名称及不同的表达形式出现,是机械设计总论中基本原理、基本概念的具体化,但它们都具有不变的实质。读者可在学习过程中从不同的侧面深刻理解这些基本概念,然后将它们迁移到具体的零部件设计当中。如果概念理解不深刻,就不能做到横向联系和融会贯通。

提高机器总体效益和避免失效是对机器和机械零件的基本要求,在设计时材料、参数等的选择实际上都是围绕这两点基本要求进行的。

本课程关系多、门类多、要求多、公式多、图形多、表格多,所以学习方法要掌握、概念理解要深刻、设计基本原则要明确、设计思路要清晰。

本书以机械设计的基本知识、基本理论和基本方法为重点,以掌握解题方法和技巧、突出重点和难点为原则,对具有普遍性的典型考题进行了分析和解答。在各章的内容提要中,概述了主要内容、基本要求、重点、难点以及考点;在专题释疑中,对一些重点和难点的问题,进行了更为深入的分析、归纳和总结;在典型例题分析中,例举以往各高校的考研试题并进行细致的分析解答;在原教材习题详解中对《机械设计》中的课后习题进行了解析;每一章的最后都提供了自测题以检验学习的效果。

本书作为考研人员的复习参考书,旨在帮助考生在较短的时间内掌握本课程的精髓及有关的内容,进行有效的复习备考。本书也是在校本科生的辅导材料和自学指南。

本书由赵镇宏、尹明富编著。参加本书编写的还有赵超雨、王伟博、景丽波、谢乐成、陈魁、王芳、王术凯、马鹏骋、落海伟、许国全、王洪芳、张洪磊。

目 录

第 1 章 机械设计总论	(1)
1.1 内容梳理与考点提示	(1)
1.1.1 机械零件的分析和设计内容	(1)
1.1.2 机械零件的主要失效形式	(1)
1.1.3 载荷与应力	(1)
1.1.4 机械零件的设计准则	(3)
1.1.5 机械零件的接触强度	(4)
1.1.6 摩擦、磨损及润滑三者之间的关系	(5)
1.1.7 各类磨损的机理	(7)
1.1.8 润滑剂	(8)
1.1.9 流体润滑原理	(11)
1.2 专题释疑	(11)
1.2.1 $\sigma-N$ 疲劳曲线	(11)
1.2.2 等寿命疲劳曲线(极限应力线图)	(12)
1.2.3 零件的极限应力图	(13)
1.2.4 单向稳定变应力时的疲劳强度计算	(14)
1.2.5 双向稳定变应力时的疲劳强度计算	(17)
1.2.6 单向不稳定变应力时的疲劳强度计算	(18)
1.3 典型例题解析	(20)
1.4 原教材习题详解	(22)
1.5 自测题及答案	(23)
1.5.1 自测题	(23)
1.5.2 自测题答案	(26)
第 2 章 螺纹联接和螺旋传动	(28)
2.1 内容梳理与考点提示	(28)
2.1.1 螺纹联接的类型	(28)
2.1.2 螺纹联接的预紧和防松	(30)
2.1.3 螺栓组联接的设计	(31)
2.1.4 提高螺栓联接强度的措施	(39)
2.2 专题释疑	(40)
2.2.1 结构设计应注意的问题	(40)



2.2.2	复杂受力螺栓组联接受力简化方法	(41)
2.2.3	螺栓联接受力分析总结	(42)
2.3	典型例题解析	(43)
2.4	原教材习题详解	(54)
2.5	自测题及答案	(59)
2.5.1	自测题	(59)
2.5.2	自测题答案	(62)
第3章	键、花键、无键联接和销联接	(65)
3.1	内容梳理与考点提示	(65)
3.1.1	键联接的分类	(65)
3.1.2	不同类型键的结构形式与性能比较	(66)
3.1.3	键的尺寸选择	(68)
3.1.4	无键联接	(69)
3.1.5	销联接	(69)
3.2	专题释疑	(69)
3.2.1	静联接和动联接中许用值的确定	(69)
3.2.2	花键定心方式的比较	(70)
3.2.3	花键的载荷分配不均匀系数 ψ	(70)
3.3	典型例题解析	(70)
3.4	原教材习题详解	(71)
3.5	自测题及答案	(76)
3.5.1	自测题	(76)
3.5.2	自测题答案	(80)
第4章	带传动	(82)
4.1	内容梳理与考点提示	(82)
4.1.1	带传动的工作原理	(82)
4.1.2	带传动的特点	(83)
4.1.3	V带的节面与公称长度	(83)
4.1.4	带传动的工作情况分析	(84)
4.1.5	带的应力分析	(86)
4.1.6	V带传动的设计计算	(87)
4.1.7	带的张紧与维护	(89)
4.2	专题释疑	(90)
4.2.1	带轮楔角大小与带楔角大小的关系	(90)
4.2.2	柔性体欧拉公式的推导	(90)
4.2.3	需要圆整的参数	(91)

4.2.4	重要参数的选择	(91)
4.2.5	弹性滑动与打滑的区别及联系	(91)
4.3	典型例题解析	(92)
4.4	原教材习题详解	(96)
4.5	自测题及答案	(98)
4.5.1	自测题	(98)
4.5.2	自测题答案	(100)
第5章	链传动	(104)
5.1	内容梳理与考点提示	(104)
5.1.1	链传动的特点	(104)
5.1.2	链传动的运动特性	(105)
5.1.3	链传动的失效形式	(107)
5.1.4	链传动的主要参数	(108)
5.1.5	链传动的布置和张紧	(109)
5.2	专题释疑	(109)
5.2.1	链传动的“多边形效应”	(109)
5.2.2	链传动产生附加动载荷的原因	(109)
5.2.3	链传动的主要参数分析	(110)
5.3	典型例题解析	(111)
5.4	原教材习题详解	(114)
5.5	自测题及答案	(116)
5.5.1	自测题	(116)
5.5.2	自测题答案	(119)
第6章	齿轮传动	(121)
6.1	内容梳理与考点提示	(121)
6.1.1	齿轮传动的失效形式与设计准则	(121)
6.1.2	齿轮的材料	(123)
6.1.3	齿轮传动的计算载荷	(123)
6.1.4	轮齿的受力分析	(125)
6.1.5	标准直齿圆柱齿轮传动的强度计算	(126)
6.1.6	标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	(129)
6.1.7	标准锥齿轮传动的强度计算	(130)
6.1.8	齿轮传动的设计参数和许用应力	(131)
6.1.9	程序框图	(132)
6.2	专题释疑	(132)
6.2.1	对动载系数 K_v 的分析	(132)



6.2.2	齿面点蚀机理的分析	(133)
6.2.3	节线附近首先发生点蚀的原因	(133)
6.2.4	有关设计参数的圆整	(134)
6.3	典型例题解析	(134)
6.4	原教材习题详解	(138)
6.5	自测题及答案	(141)
6.5.1	自测题	(141)
6.5.2	自测题答案	(145)
第7章	蜗杆传动	(147)
7.1	内容梳理与考点提示	(147)
7.1.1	蜗杆传动的类型和特点	(147)
7.1.2	普通圆柱蜗杆传动的主要参数及几何尺寸计算	(148)
7.1.3	普通圆柱蜗杆传动的承载能力计算	(150)
7.1.4	普通圆柱蜗杆传动的效率、润滑及热平衡计算	(152)
7.2	专题释疑	(154)
7.2.1	蜗杆传动的受力分析	(154)
7.2.2	蜗杆传动的材料选择	(155)
7.2.3	蜗杆传动设计时的注意事项	(155)
7.3	典型例题解析	(156)
7.4	原教材习题详解	(162)
7.5	自测题及答案	(163)
7.5.1	自测题	(163)
7.5.2	自测题答案	(165)
第8章	滑动轴承	(169)
8.1	内容梳理与考点提示	(169)
8.1.1	滑动轴承的类型、特点和应用场合	(169)
8.1.2	滑动轴承的材料及轴瓦结构	(170)
8.1.3	不完全液体润滑滑动轴承的设计计算	(171)
8.1.4	液体动力润滑径向滑动轴承的设计计算	(173)
8.2	专题释疑	(177)
8.2.1	液体动力润滑径向滑动轴承的设计参数	(177)
8.2.2	液体动力润滑径向滑动轴承的参数选择	(177)
8.2.3	承载系数 C_p	(178)
8.3	典型例题解析	(178)
8.4	原教材习题详解	(183)
8.5	自测题及答案	(184)

8.5.1	自测题	(184)
8.5.2	自测题答案	(187)
第9章	滚动轴承	(190)
9.1	内容梳理与考点提示	(190)
9.1.1	滚动轴承的构造	(190)
9.1.2	滚动轴承的材料	(190)
9.1.3	滚动轴承的特点	(191)
9.1.4	滚动轴承的主要类型及其代号	(191)
9.1.5	滚动轴承类型的选择	(193)
9.1.6	滚动轴承的工作情况	(194)
9.1.7	滚动轴承的失效形式和计算准则	(195)
9.1.8	滚动轴承尺寸的选择	(195)
9.1.9	滚动轴承的组合结构设计	(201)
9.2	专题释疑	(204)
9.2.1	角接触轴承轴向力的计算	(204)
9.2.2	7类轴承与6类轴承的承载能力比较	(205)
9.2.3	关于轴承的预紧	(205)
9.3	典型例题解析	(205)
9.4	原教材习题详解	(208)
9.5	自测题及答案	(212)
9.5.1	自测题	(212)
9.5.2	自测题答案	(214)
第10章	联轴器与离合器	(217)
10.1	内容梳理与考点提示	(217)
10.1.1	联轴器和离合器的功用	(217)
10.1.2	联轴器的类型、应用场合和选择	(217)
10.1.3	离合器的类型和应用场合	(219)
10.2	专题释疑	(219)
10.2.1	联轴器的选择原则	(219)
10.2.2	合理选择联轴器的类型	(220)
10.2.3	弹性元件联轴器的选用	(220)
10.3	典型例题解析	(221)
10.4	原教材习题详解	(223)
10.5	自测题及答案	(225)
10.5.1	自测题	(225)
10.5.2	自测题答案	(227)



第 11 章 轴	(230)
11.1 内容梳理与考点提示	(230)
11.1.1 轴的功用、分类与组成	(230)
11.1.2 轴的材料及其选择原则	(231)
11.1.3 轴的结构设计	(231)
11.1.4 轴的计算	(234)
11.1.5 提高轴的强度、刚度和疲劳强度的措施	(237)
11.2 专题释疑	(238)
11.2.1 轴的设计特点	(238)
11.2.2 关于轴的结构设计的提示	(239)
11.2.3 轴危险截面的确定	(239)
11.3 典型例题解析	(240)
11.4 原教材习题详解	(247)
11.5 自测题及答案	(249)
11.5.1 自测题	(249)
11.5.2 自测题答案	(252)
第 12 章 弹 簧	(255)
12.1 内容梳理与考点提示	(255)
12.1.1 弹簧的分类及主要功用	(255)
12.1.2 弹簧的特性曲线、刚度及变形能	(255)
12.1.3 弹簧的材料	(257)
12.1.4 圆柱螺旋弹簧的制造	(257)
12.1.5 圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的设计计算	(257)
12.1.6 圆柱螺旋扭转弹簧的设计计算	(260)
12.2 专题释疑	(261)
12.2.1 弹簧旋绕比 C 的选取	(261)
12.2.2 受静载荷圆柱螺旋弹簧的设计步骤	(261)
12.3 典型例题解析	(261)
12.4 原教材习题详解	(266)
12.5 自测题及答案	(267)
12.5.1 自测题	(267)
12.5.2 自测题答案	(268)

第1章 机械设计总论

基本要求

本章涵盖了濮良贵教授在高教社主编的《机械设计(第七版)》教材中的绪论、机械设计总论、机械零件的强度、摩擦、磨损及润滑概述等内容。集中了许多机械设计的共性基础知识,以便于在学习后续零件设计时直接引用,也有利于了解零件设计的规律、特性。

本章考点

- 机械零件的失效形式和设计准则。
- 疲劳曲线的特点、方程及其应用。
- 材料试件和机械零件的极限应力线图的特点及其绘制。
- 单向稳定变应力时机械零件在单向应力状态及复合应力状态下的疲劳强度计算。
- 各种摩擦及磨损的机理、物理特征及其影响因素。

本章难点

变应力作用下零件的疲劳曲线、极限应力图、疲劳损伤累积假说及其应用。

1.1 内容梳理与考点提示

1.1.1 机械零件的分析和设计内容

机械零件分析和设计的内容为工作原理、失效形式、设计准则、常用材料、承载能力计算、参数选择和结构设计等。这些问题始终贯穿在以后各章中,本章涉及的是机械设计的共性基础知识,内容非常原则但不具体,在以后的各章中才能将它具体化。

1.1.2 机械零件的主要失效形式

机械零件的主要失效形式有以下4种。

- 整体断裂:包括过载折断、疲劳断裂。
- 过大的残余变形:当应力超过材料的屈服极限时产生的残余变形。
- 零件的表面破坏:包括腐蚀、磨损和接触疲劳。
- 破坏正常工作条件所引起的失效。

1.1.3 载荷与应力

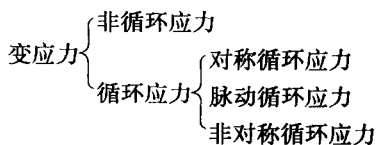
载荷与应力所涉及的主要概念有如下几个。



- 名义载荷:根据额定功率利用力学公式计算出的作用在零件上的载荷。
- 名义应力:根据名义载荷求得的应力。
- 计算载荷:载荷系数 K 与名义载荷的乘积。
- 计算应力:由计算载荷求得的应力。
- 静载荷:不随时间变化或变化缓慢的载荷。
- 静应力:不随时间变化或变化缓慢的应力。
- 变载荷:随时间作周期性变化或非周期性变化的载荷。
- 变应力:随时间变化的应力。

1. 循环应力的概念

随时间作周期性变化的应力称为循环应力。



注意: { 静载荷 → 静应力
变载荷 → 变应力

2. 循环应力的 5 个参数

如图 1-1 所示,表示循环应力的 5 个参数有最大应力 σ_{max} 、最小应力 σ_{min} 、平均应力 $\sigma_m = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{max}}{2}$ 、应力幅 $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ 、循环特性 $r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ 。

一个循环应力可用上述 5 个参数中的任意两个来表示。

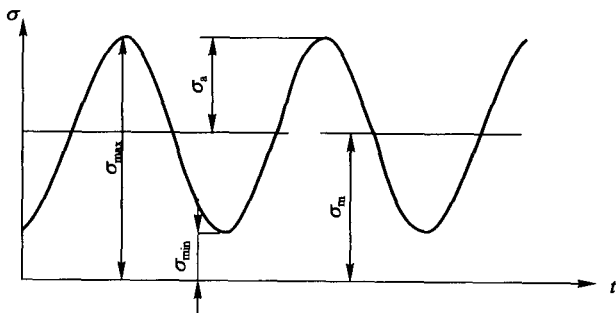


图 1-1 表示循环应力的 5 个参数

对称循环应力、脉动循环应力和静应力可视为循环应力中的一些特例。其特征为以下几点。

- 对称循环应力: $r = -1, \sigma_m = 0, \sigma_a = \sigma_{max} = -\sigma_{min}$ 。
- 脉动循环应力: $r = 0, \sigma_{min} = 0, \sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2}$ 。
- 静应力: $r = +1, \sigma_a = 0, \sigma_m = \sigma_{max} = \sigma_{min}$ 。

稳定循环变应力图谱如图 1-2 所示。

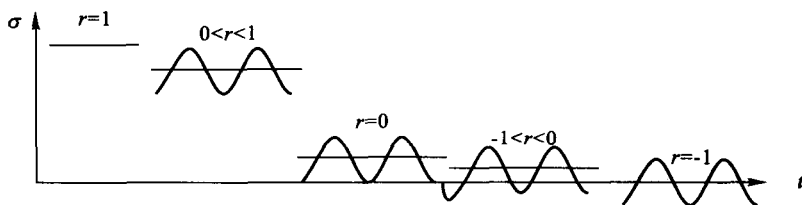


图 1-2 稳定循环变应力图谱

注意:任何非对称循环变应力都是由其值为 σ_m 的静应力与 σ_a 的对称循环变应力迭加而成。

r 、 σ_a 及应力循环次数 N 对金属疲劳都有影响,影响零件疲劳强度的决定因素是应力幅。

当 σ_{max} 相同时, σ_a 越大,材料达到疲劳破坏所需应力循环次数 N 越小;当 σ_{max} 相同时, r 值越小,材料越易疲劳。

1.1.4 机械零件的设计准则

1. 强度准则

(1) 强度准则是指零件中的应力不得超过允许的限度。其代表性的表达式为:

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{lim}}{[S_\sigma]} \quad \tau \leq [\tau] = \frac{\tau_{lim}}{[S_\tau]} \quad (1-1)$$

零件在静应力条件下,其失效形式为脆性材料断裂或塑性材料变形。

- 对于塑性材料零件,应按不发生塑性变形的条件进行强度计算。此时 $\sigma_{lim} = \sigma_S$ 或 $\tau_{lim} = \tau_S$ 。
- 对于脆性材料零件,应按不发生断裂的条件进行强度计算,此时 $\sigma_{lim} = \sigma_b$ 或 $\tau_{lim} = \tau_b$ 。在循环应力作用下,零件的失效形式是疲劳破坏。此时 $\sigma_{lim} = \sigma_{rN}$ 或 $\tau_{lim} = \tau_{rN}$ 。

强度准则是最重要的设计准则。本章把各章零件强度计算共性问题集中到一起,略去零件的具体内容,而突出阐述零件强度设计计算的基本理论和方法。这是为了使读者了解一个问题,即各种强度计算方法从本质上讲都是一样的。不同零件的强度计算公式在形式上可能不同,这仅仅是由于零件本身的特殊性以及设计中沿用的一些惯例,而不是强度计算方法的原则有什么不同。

(2) 用安全系数表示:

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma} \geq [S_\sigma] \quad S_\tau = \frac{\tau_{lim}}{\tau} \geq [S_\tau] \quad (1-2)$$

2. 刚度准则

刚度准则要求零件在载荷作用下产生的弹性变形量 y 小于或等于机器工作性能所允许的多极限值。其表达式为 $y \leq [y]$ 。



3. 寿命准则
4. 振动稳定性准则
5. 可靠性准则

1.1.5 机械零件的接触强度

高副零件工作时,理论上点是接触或线接触,实际上由于接触部分的局部弹性变形而形成面接触,但由于接触面积很小,从而使表层产生的局部应力很大,该应力称为接触应力。在表面接触应力作用下的零件强度称为接触强度。计算依据为弹性力学的赫兹(Hertz)公式

1. 接触应力

(1) 两圆柱体接触

$$\text{最大接触应力: } \sigma_{H \max} = \sqrt{\frac{F \left[\frac{1}{\rho_{\Sigma}} \right]}{\pi b \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (1-3)$$

当泊松比 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3, E_1 = E_2 = E$ 时, $\sigma_{H \max} = 0.418 \sqrt{\frac{FE}{b\rho_{\Sigma}}}$ 。

(2) 两球体接触

$$\text{最大接触应力: } \sigma_{H \max} = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{bF \left[\frac{\frac{1}{\rho_{\Sigma}}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}} \right]^2} \quad (1-4)$$

当泊松比 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3, E_1 = E_2 = E$ 时, $\sigma_{H \max} = 0.388 \sqrt[3]{\frac{FE^2}{\rho_{\Sigma}^2}}$ 。

其中 ρ_{Σ} 为综合曲率半径:

$$\frac{1}{\rho_{\Sigma}} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2} \quad \left\{ \begin{array}{l} + \rightarrow \text{外接触} \\ - \rightarrow \text{内接触} \end{array} \right.$$



说明:① 圆柱体的最大接触应力 $\sigma_{H \max}$ 约等于 $F^{\frac{1}{2}}$, 球的最大接触应力 $\sigma_{H \max}$ 约等于 $F^{\frac{1}{3}}$ $\therefore \sigma_{H \max}$ 与 F 不呈线性关系。

② 圆柱体的最大接触应力 $\sigma_{H \max}$ 约等于 $\frac{1}{\rho_{\Sigma}^{\frac{1}{2}}}$, 球的最大接触应力 $\sigma_{H \max}$ 约等于 $\frac{1}{\rho_{\Sigma}^{\frac{2}{3}}}$
 $\therefore \rho_{\Sigma}$ 越大, $\sigma_{H \max}$ 越小。

③ 在同样的 ρ_1, ρ_2 的情况下, 内接触时 ρ_{Σ} 较小, $\sigma_{H \max}$ 较小, 约为外接触时的 48%, 所以重载情况下, 采用内接触有利于提高承载能力或降低接触副的尺寸。

2. 失效形式

在静应力作用下,脆性材料的失效形式是表面压溃,而塑性材料的失效形式是表面塑性变形。

在变应力(脉动循环)作用下,齿轮、滚动轴承的常见失效形式是发生疲劳点蚀。

3. 提高接触疲劳强度的措施

提高接触疲劳强度的措施主要有如下 5 点:

- 控制最大接触应力 $\sigma_{H \max} \leq [\sigma_H]$ 。
- 提高接触表面硬度,改善表面加工质量。
- 增大综合曲率半径 ρ_{Σ} 。
- 改外接触为内接触,点接触为线接触。
- 采用高粘度润滑油。

1.1.6 摩擦、磨损及润滑三者之间的关系

首先介绍摩擦、磨损、润滑的概念如下。

- 摩擦:两个接触的物体在接触表面间相对滑动或有这一趋势时产生阻碍其发生相对滑动的切向阻力,这种现象叫摩擦。
- 磨损:由于摩擦引起的摩擦能耗和导致表面材料的不断损耗或转移,即磨损。磨损使零件的表面形状与尺寸遭到缓慢而连续地破坏,使精度、可靠性和效率降低。
- 润滑:减少摩擦、降低磨损的一种有效手段。

滑动摩擦有 4 种状态:干摩擦、边界摩擦(边界润滑)、流体摩擦(流体润滑)以及混合摩擦(混合润滑)。

1. 干摩擦

两摩擦表面直接接触,不加入任何润滑剂的摩擦称为干摩擦。摩擦涉及的常见理论如下。

(1) 库仑公式

$$F_f = fF_n (F_n \text{——法向力}) \quad (1-5)$$

机械摩擦理论认为两个粗糙表面接触时,接触点相互啮合,摩擦力为啮合点间切向阻力的总和,表面越粗糙,摩擦力就越大。但不能解释光滑表面间的摩擦现象,即表面愈光滑、接触面越大, F_f 越大,且与滑动速度 V 有关。

(2) 粘着理论

① 简单粘着理论

摩擦副真实接触面积 A_r 只有表现接触面积 A 的百分之一和万分之一, $A_r = A / (100 \sim 10\,000)$,所以接触面上压力很大,很容易达到材料的压缩屈服极限 σ_s 而产生塑性流动,使接触面积增大,所以虽然 F_n 升高但应力并不升高。因为 $A_r = \frac{F_n}{\sigma_s}$,接触点塑性变形后使脏污膜遭破坏,容易使基本金属产生粘着现象而产生冷焊结点,当相对滑动时先将结点切开。

设结点的剪切强度极限为 τ_B , 则摩擦力为 $F_f = A_f \tau_B = \frac{F_n}{\sigma_{Sy}} \tau_B$, 因此金属摩擦系数 $f = \frac{F_f}{F_n} = \frac{\tau_B}{\sigma_{Sy}}$ 。因为大多数金属的 τ_B/σ_{Sy} 比值很相近, 所以 f 也很相近。

降低摩擦系数的措施: 在硬金属基体表面涂覆一层极薄的软金属, 这是因为 σ_{Sy} 取决于基体材料, τ_B 取决于软金属。

② 修正粘附理论

$$f = \frac{F_f}{F_n} = \frac{\tau_B}{\sigma'_{Sy}} = \frac{\text{界面剪切强度极限}}{\text{两金属基体中较软者的压缩屈服极限}} \quad (1-6)$$

2. 边界摩擦(边界润滑)

摩擦面上有一层边界膜起润滑作用的摩擦称为边界摩擦。

所谓边界膜就是比较牢固地吸附在金属表面上的分子膜。按边界膜的形成机理可将边界膜分为吸附膜(物理吸附膜及化学吸附膜)和化学反应膜。

- 物理吸附膜: 润滑油中脂肪酸极性分子与金属表面相互吸引而引成的吸附膜, 距表面愈远吸附能力愈弱, 剪切强度愈低, f 随层数而下降。
- 化学吸附膜: 由润滑油中的分子靠分子键与金属表面形成的吸附膜, 强度性和稳定性好于物理吸附膜, 受热后熔化温度较高, 适合于在中等载荷、速度和温度下工作。
- 化学反应膜: 润滑油中加入硫、磷等元素的化合物(即添加剂)与金属表面进行化学反应而形成的膜, 特点是较厚、熔点较高、剪切强度较低、稳定性较好, 所以适合于在重载、高速和高温下工作。

减小边界摩擦的主要措施有以下 4 点:

- 控制 $p v$ (控制摩擦发热, 防止脱附)。
- 合理选择摩擦副材料及润滑剂。
- 降低表面粗糙度。
- 在润滑剂中加入油性润滑剂和极压添加剂, 提高边界膜的强度。

3. 混合摩擦(混合润滑)

当摩擦表面间处于边界摩擦与流体摩擦的混合状态时(膜厚比 $\lambda = 1 \sim 3$)称为混合摩擦。

膜厚比: $\lambda = h_{\min} / (R_{q1}^2 + R_{q2}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1-7)$

式中, h_{\min} : 两滑动表面间的最小公称油膜厚度。

- R_{q1}, R_{q2} : 分别为两表面轮廓的均方根偏差。
- 当 $\lambda \leq 1$: 边界摩擦。
- 当 $\lambda \leq 1 \sim 3$: 混合摩擦, λ 越大, 油膜承载比例越大, 此时虽仍有一些微凸体直接接触, 但其摩擦阻力小得多, f 也比边界摩擦小得多。
- 当 $\lambda > 3$: 流体摩擦。

4. 流体摩擦(流体润滑)

膜厚比 $\lambda > 3$ 的摩擦称为流体摩擦。

摩擦表面间的润滑膜厚度大到足以将两个表面的轮廓完全隔开时,即形成了全液体摩擦,此时 f 极小,是理想的摩擦状态。

1.1.7 各类磨损的机理

磨损是摩擦的直接结果,磨损会造成材料损耗、效率 η 降低、工作精度下降、可靠性降低等,这一般都是有害的,但工程上也有利用磨损作用的场合,如精加工中的磨削与抛光、机器的跑合等。

1. 典型的磨损过程

如图 1-3 所示,磨损具有以下几个阶段。

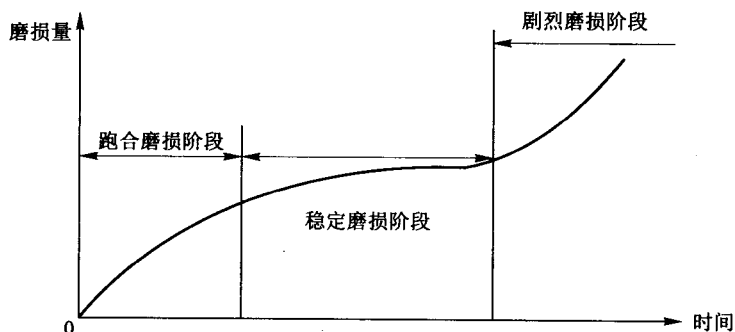


图 1-3 磨损阶段

(1) 跑合磨损阶段

在磨损初期,由于新的摩擦副表面较粗糙,真实接触面积小,比压较大,所以在开始的较短时间内磨损量较大。经跑合后,表面凸峰高度降低,接触面积增大,磨损速度减缓并趋向稳定。初期跑合是一种有益的磨损,可利用它来改善表面性能,提高使用寿命。

(2) 稳定磨损阶段

经磨合的摩擦表面加工硬化,形成了稳定的表面粗糙度,摩擦条件保持相对稳定,磨损较缓慢,该段时间的长短将反映零件的寿命。

(3) 剧烈磨损阶段

经稳定磨损后,零件表面破坏,运动副间隙增大,出现动载和震动,润滑状态改变,从而使温度升高、磨损速度急剧上升,直至零件失效。

※ 注意:实际机械零件在使用过程中,这三个阶段无明显界限。若不经压力过大、 v 过高或润滑不良等,即稳定磨损阶段,那么经跑合后直接进入剧烈磨损阶段。