



普通高等教育“十二五”规划教材
高等工科院校卓越工程师教育教材

上海大学 傅燕鸣 编著

机械设计

学习指导

JIXIE SHEJI XUEXI ZHIDAO

上海科学技术出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
高等工科院校卓越工程师教育教材

机械设计学习指导

上海大学 傅燕鸣 编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械设计学习指导 / 上海大学, 傅燕鸣编著. —上海: 上海科学技术出版社, 2015. 9

普通高等教育“十二五”规划教材. 高等工科院校卓越工程师教育教材

ISBN 978-7-5478-2696-6

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 140990 号



机械设计学习指导

上海大学 傅燕鸣 编著

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社

(上海钦州南路71号 邮政编码200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行
200001 上海福建中路193号 www.ewen.co

常熟市兴达印刷有限公司印刷

开本 787 × 1092 1/16 印张 19

字数 470 千字

2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-2696-6/TH·54

定价: 48.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书是针对高等院校机械类专业的学生进行机械设计课程的复习、课程应考以及报考机械类专业硕士研究生所编写的。

本书分为 2 篇及附录。第 1 篇为机械设计学习指导,共分 11 章,每章内容包括知识要点、复习思考题、自测题和自测题参考答案。第 2 篇为机械设计试题,编入的试卷具有内容丰富、覆盖面广的特点,以便学生熟悉各种题型,开阔眼界,掌握机械设计课程的基本要求。本书最后的附录编入了上海大学 2013 年攻读硕士学位研究生“机械设计”入学考试试题及参考解答,以便学生为报考硕士研究生做必要的准备。

本书除可作为机械类专业学生课程应考和硕士学位研究生报考人员的考前热身教材外,也可供教师课程命题参考。

前 言

机械设计是机械类专业的一门主干专业基础课程,也是机械工程一级学科各专业硕士研究生入学考试的课程之一。该课程具有很强的理论性与实践性,学生往往感到内容多,工程实际问题多,不知如何通过该课程考试。实际上,学好这门课程与顺利地通过这门课程的考试,两者的要求是不同的。前者要求掌握课程的总体概貌,不但要掌握这门课程的基本概念、基本内容以及基本方法,还要了解它们的来龙去脉,知道所学内容从何处来,用在何处,如何应用;后者是检验所学内容的掌握情况,注重课程内各概念和内容之间的联系,强调计算技能以及运用基本理论分析处理实际问题的能力。这两者之间没有包含关系,所以顺利地通过考试也是一门学问。本书的编写,就是希望在这方面对读者有所帮助。

本书分为2篇及附录。第1篇为机械设计学习指导,共分11章,每章内容包括:①知识要点:对机械设计每章的基本知识、基本理论和基本方法进行详细分析、归纳和总结,以便使学生能快速地把握知识要点,提高复习效率;②复习思考题:对每章的一些重点及难点内容以复习思考题的形式给出,可供学生在复习总结时参考;③自测题:对每章的自测题以是非题、单项选择题和分析、计算题等形式给出,有助于学生演练,更好地掌握考试要点;④自测题参考答案:对自测题中每一道试题,都提供了较为详尽的解答,以便学生检查备考复习效果。第2篇为机械设计试题,编入的试卷具有内容丰富、覆盖面广的特点,以便学生熟悉各种题型,开阔眼界,掌握机械设计课程的基本要求。本书最后的附录编入了上海大学2013年攻读硕士学位研究生“机械设计”入学考试试题及参考解答,以便学生为报考硕士研究生做必要的准备。

编者希望本书对学生课程应考、机械类专业研究生的入学考试以及教师较好地组织本课程试卷有所帮助。本书可以作为高等院校“机械设计”课程学生的教学辅导用书,也可以作为教师的教学参考用书。

本书由傅燕鸣编著。插图由傅昊赞、朱磊、周暄妍、李晓腾制作,书稿文字由蔡忠琴录入。由于编者的水平有限、时间仓促,本书错误或不妥之处在所难免,恳请广大读者不吝批评指正。

编 者

2015年2月于上海大学

目 录

第 1 篇 机械设计学习指导

第 1 章 机械零件的强度	3
1.1 知识要点	3
1.2 复习思考题	8
1.3 自测题	10
1.4 自测题参考答案	13
第 2 章 螺纹连接和螺旋传动	19
2.1 知识要点	19
2.2 复习思考题	25
2.3 自测题	27
2.4 自测题参考答案	33
第 3 章 键、花键和销连接	41
3.1 知识要点	41
3.2 复习思考题	43
3.3 自测题	44
3.4 自测题参考答案	47
第 4 章 带传动	49
4.1 知识要点	49
4.2 复习思考题	52
4.3 自测题	54
4.4 自测题参考答案	57

第 5 章 链传动	61
5.1 知识要点	61
5.2 复习思考题	64
5.3 自测题	66
5.4 自测题参考答案	68
第 6 章 齿轮传动	70
6.1 知识要点	70
6.2 复习思考题	77
6.3 自测题	81
6.4 自测题参考答案	85
第 7 章 蜗杆传动	91
7.1 知识要点	91
7.2 复习思考题	96
7.3 自测题	98
7.4 自测题参考答案	102
第 8 章 滑动轴承	105
8.1 知识要点	105
8.2 复习思考题	111
8.3 自测题	114
8.4 自测题参考答案	119
第 9 章 滚动轴承	123
9.1 知识要点	123
9.2 复习思考题	128
9.3 自测题	131
9.4 自测题参考答案	137
第 10 章 联轴器和离合器	146
10.1 知识要点	146
10.2 复习思考题	148

10.3 自测题	149
10.4 自测题参考答案	153
第 11 章 轴	156
11.1 知识要点	156
11.2 复习思考题	162
11.3 自测题	165
11.4 自测题参考答案	170

第 2 篇 机械设计试题

机械设计(一)试题 1	179
机械设计(一)试题 1 解答	183
机械设计(一)试题 2	188
机械设计(一)试题 2 解答	192
机械设计(一)试题 3	197
机械设计(一)试题 3 解答	201
机械设计(一)试题 4	205
机械设计(一)试题 4 解答	209
机械设计(一)试题 5	213
机械设计(一)试题 5 解答	216
机械设计(一)试题 6	220
机械设计(一)试题 6 解答	224
机械设计(二)试题 1	228
机械设计(二)试题 1 解答	231
机械设计(二)试题 2	235
机械设计(二)试题 2 解答	239
机械设计(二)试题 3	243
机械设计(二)试题 3 解答	249
机械设计(二)试题 4	254
机械设计(二)试题 4 解答	259
机械设计(二)试题 5	262

机械设计(二)试题 5 解答·····	266
机械设计(二)试题 6 ·····	270
机械设计(二)试题 6 解答·····	274

附录 上海大学 2013 年攻读硕士学位研究生 “机械设计”入学考试试题及参考解答

上海大学 2013 年攻读硕士学位研究生“机械设计”入学考试试题 ·····	281
上海大学 2013 年攻读硕士学位研究生“机械设计”入学考试试题参考解答 ·····	286
参考文献·····	293

1

第 1 篇

机械设计学习指导

第 1 章 机械零件的强度

1.1 知识要点

1.1.1 载荷分类

(1) 按与时间的关系分 可分为静载荷和变载荷,变载荷又可分为随机变载荷和循环变载荷,而循环变载荷又分为非对称循环变载荷、对称循环变载荷和脉动循环变载荷。

- 1) 静载荷: 大小和方向不随时间变化或变化非常缓慢的载荷。
- 2) 变载荷: 大小和方向随时间变化的载荷。
- 3) 随机变载荷: 大小和方向随时间变化,无规律可循的载荷。
- 4) 循环变载荷: 大小和方向随时间做周期性变化的载荷。

几种典型的载荷谱如图 1-1-1 所示。

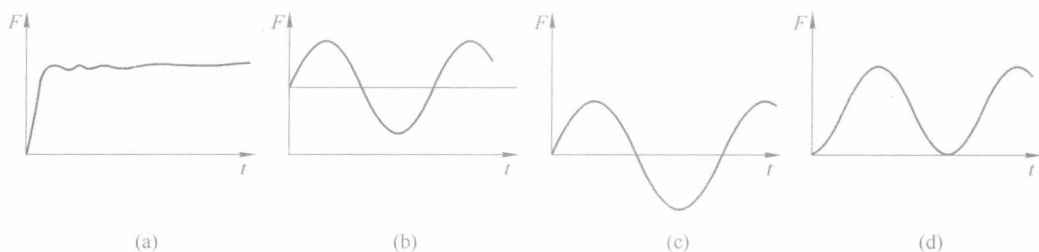


图 1-1-1 几种典型的载荷谱

(a) 静载荷; (b) 非对称循环变载荷; (c) 对称循环变载荷; (d) 脉动循环变载荷

(2) 按应用计算场合分 可分为名义载荷和计算载荷。

1) 名义载荷: 由原动机的额定功率或机器负载计算得出的载荷值,它是机器在平稳工作条件下作用在零件上的载荷,又称额定载荷。

2) 计算载荷: 考虑机器工作时零件受到动载荷和载荷分布不均等情况影响的载荷。通常计算载荷可定义为载荷系数 K 与名义载荷的乘积。


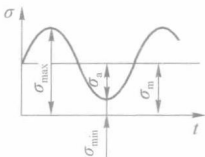
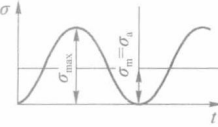
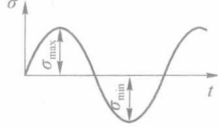
1.1.2 应力分类

按与时间的关系分,应力可分为静应力和变应力,变应力又可分为随机变应力和循环变应力,而循环变应力又分为非对称循环变应力、对称循环变应力和脉动循环变应力。

- 1) 静应力: 大小和方向不随时间变化或变化非常缓慢的应力。
- 2) 变应力: 大小和方向随时间变化的应力。
- 3) 随机变应力: 大小和方向随时间变化,无规律可循的应力。
- 4) 循环变应力: 大小和方向随时间做周期性变化的应力。

应力类型及其应力参数间的关系见表 1-1-1。

表 1-1-1 应力类型及其应力参数

分类	静应力	非对称循环变应力	脉动循环变应力	对称循环变应力
应力变化谱				
应力与参数的关系	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \sigma_m$ $\sigma_a = 0$ $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 1$	$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$	$\sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2}$ $\sigma_{\min} = 0$ $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0$	$\sigma_m = 0$ $\sigma_a = \sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$ $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$

式中 σ_{\max} ——最大应力；
 σ_{\min} ——最小应力；
 σ_m ——平均应力，相当于循环中应力不变部分；
 σ_a ——应力幅，相当于循环中应力变动部分；
 r ——应力比(循环特性)，表示变应力的不对称程度， $-1 \leq r \leq 1$

静应力是在静载荷作用下产生的，变应力可以在变载荷下产生，也可以在静载荷下产生，如受径向力的回转轴产生对称循环变应力，相啮合的齿轮齿面产生脉动循环的接触变应力，轴承内外圈滚道表面产生脉动循环的接触变应力等均是在静载荷作用下的机械零件产生变应力的典型例子。

1.1.3 材料的疲劳强度

(1) **疲劳断裂的特征** 零件材料长时间在远低于材料强度极限的交变应力作用下会产生裂纹和断裂的现象称为疲劳破坏。在交变应力作用下的零件材料发生疲劳破坏的主要形式是疲劳断裂。发生这种失效时，首先在零件表面应力较大处产生裂纹，然后裂纹向深处发展，直至余下的截面应力超过材料的强度极限时便发生全部断裂。因此一个典型的疲劳断口往往由疲劳裂纹源区、光滑的疲劳区和粗糙的断裂区组成，如图 1-1-2 所示。

(2) **$\sigma-N$ 疲劳曲线** 在一定的应力比 r 下，材料的疲劳极限(以最大应力 σ_{\max} 表征)与应力循环次数 N 的关系曲线通常称为 $\sigma-N$ 疲劳曲线，如图 1-1-3 所示。疲劳曲线是研究材料疲劳强度的基本曲线，它反映了材料抵抗疲劳断裂的能力，通常分为有限寿命区和无限寿命区，以循环基数 N_0 为界。利用疲劳曲线可以对只需要工作一定期限的零件进行有限寿命设计，以期减小零件的尺寸和重量。若已知材料的循环基数 N_0 和疲劳极限 σ_r ，则应力循环 N 次时的疲劳极限为

$$\sigma_{rN} = \sigma_r \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} = K_N \sigma_r \quad (1-1-1)$$

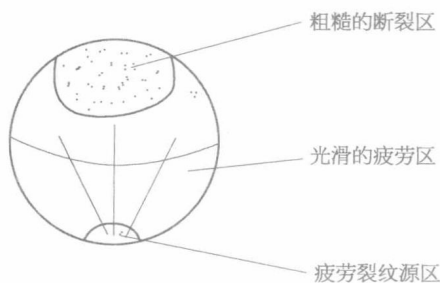


图 1-1-2 单向弯曲时的疲劳断口

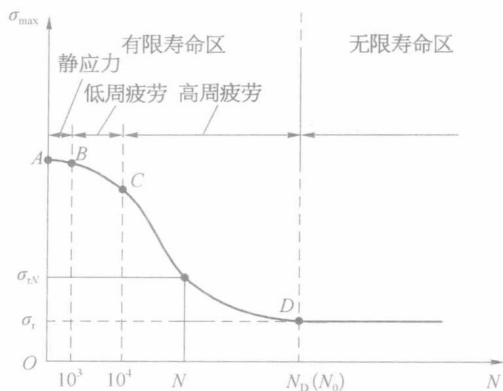


图 1-1-3 $\sigma-N$ 疲劳曲线

式中， K_N 称为寿命系数。因此，在做有限寿命设计确定材料的疲劳极限 σ_{rN} 时，只要用相应循环特征的无限寿命疲劳极限 σ_r 与寿命系数 K_N 相乘即可。

(3) 等寿命疲劳曲线(极限应力线图) 在一定的应力循环次数 N 下，材料疲劳极限的应力幅 σ_a 与平均应力 σ_m 的关系曲线通常称为等寿命疲劳曲线，即 $\sigma_a - \sigma_m$ 极限应力线图。按试验的结果，等寿命疲劳曲线为二次曲线。工程上为方便起见，对塑性材料常使用由对称循环疲劳极限 σ_{-1} 、脉动循环疲劳极限 σ_0 和屈服极限 σ_s 绘制的简化极限应力线图，如图 1-1-4 所示。图中 $A'G'$ 线表示疲劳强度极限线，其方程为

$$\sigma_{-1} = \sigma'_a + \varphi_\sigma \sigma'_m \quad (1-1-2)$$

式中， φ_σ 为材料受循环弯曲应力时的材料常数，其值由下式决定

$$\varphi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \quad (1-1-3)$$

$G'C$ 线表示屈服强度极限线，其方程为

$$\sigma'_m + \sigma'_a = \sigma_s \quad (1-1-4)$$

如果材料承受的工作应力点位于 $OA'G'C$ 区域内，最大应力既不超过疲劳极限，也不超过屈服极限，则表示材料不发生破坏；若在此区域以外，则一定会发生破坏。

1.1.4 机械零件的疲劳强度

(1) 影响机械零件疲劳极限的因素 影响零件疲劳极限的因素有零件的应力集中、绝对尺寸、表面质量及强化因素等，可以引入一综合影响系数 K_σ 统一考虑，其值由下式决定

$$K_\sigma = \left(\frac{k_\sigma}{\epsilon_\sigma} + \frac{1}{\beta_\sigma} - 1 \right) \frac{1}{\beta_q} \quad (1-1-5)$$

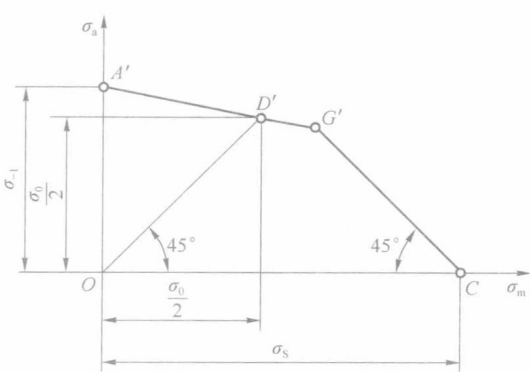


图 1-1-4 材料简化的极限应力线图

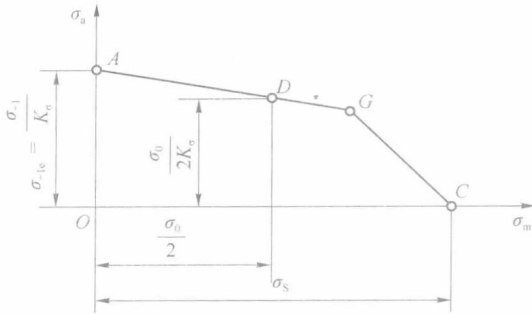


图 1-1-5 零件的简化极限应力线图

零件屈服强度极限线 GC 方程为

$$\sigma'_{me} + \sigma'_{ac} = \sigma_s \quad (1-1-7)$$

利用零件的简化极限应力线图,可以判断零件是否发生失效,并能进一步确定零件是发生疲劳失效还是塑性变形失效。

(2) 单向稳定变应力时机械零件的疲劳强度计算 进行机械零件疲劳强度计算时,首先根据零件危险截面上的 σ_{max} 和 σ_{min} 确定平均应力 σ_m 与应力幅 σ_a ,然后在极限应力线图的坐标中标出相应的工作应力点 M 或 N ,最后根据零件的工作应力变化规律来确定极限应力点 M' 或 N' 。判断稳定变应力下机械零件的疲劳强度通常采用安全系数法,计算公式见表 1-1-2。使用时应注意:零件做有限寿命设计时,在公式中应以有限寿命疲劳极限 σ_{-1N} 代替 σ_{-1} ;在尚不能确定零件是由于疲劳强度还是静载强度失效时,除要按公式校核疲劳强度外,还应注意校核零件的静强度;当零件有几个危险截面时,应分别计算其安全系数,以便进行比较改进设计。

表 1-1-2 变应力下机械零件的强度计算公式

工作应力变化规律		$r = C$ (绝大多数转轴中的应力状态)	$\sigma_m = C$ (振动着的受载弹簧中的应力状态)	$\sigma_{min} = C$ (紧螺栓连接中螺栓受轴向变载荷时的应力状态)
单向 稳定 变应力	工作应力点			
	M (疲劳强度计算)	$S_{ca} = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \sigma_a + \varphi_\sigma \sigma_m} \geq S \quad (1-1-8)$ $S'_a = S_{ca} \quad (1-1-9)$	$S_{ca} = \frac{\sigma_{-1} + (K_\sigma - \varphi_\sigma) \sigma_m}{K_\sigma (\sigma_a + \sigma_m)} \geq S \quad (1-1-10)$ $S'_a = \frac{\sigma_{-1} - \varphi_\sigma \sigma_m}{K_\sigma \sigma_a} \geq S_a \quad (1-1-11)$	$S_{ca} = \frac{2\sigma_{-1} + (K_\sigma - \varphi_\sigma) \sigma_{min}}{(K_\sigma + \varphi_\sigma)(2\sigma_a + \sigma_{min})} \geq S \quad (1-1-12)$ $S'_a = \frac{\sigma_{-1} - \varphi_\sigma \sigma_{min}}{(K_\sigma + \varphi_\sigma) \sigma_a} \geq S_a \quad (1-1-13)$
	N (静强度计算)	$S_{ca} = \frac{\sigma_s}{\sigma_a + \sigma_m} \geq S \quad (1-1-14)$		

式中, k_σ 为零件的有效应力集中系数; ϵ_σ 为零件的尺寸系数; β_σ 为零件的表面质量系数; β_q 为零件的强化系数。在零件受变应力作用时,由于变应力的平均应力 σ_m 是应力的不变部分,因此综合影响系数 K_σ 只对变应力中的应力幅 σ_a 有影响。图 1-1-5 为设计塑性材料零件的简化极限应力线图。图中零件疲劳强度极限线 AG 方程为

$$\sigma_{-1} = K_\sigma \sigma'_{ae} + \varphi_\sigma \sigma'_{me} \quad (1-1-6)$$

续表

工作应力变化规律		$r = C$ (绝大多数转轴中的应力状态)	$\sigma_m = C$ (振动着的受载弹簧中的应力状态)	$\sigma_{\min} = C$ (紧螺栓连接中螺栓受轴向变载荷时的应力状态)
单向变应力	对称循环	$S_{ca} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ca}} \geq S, \sigma_{ca} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^z n_i \sigma_i^m}$ (1-1-15)		
	非对称循环	$S_{ca} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ca}} \geq S, \sigma_{ca} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^z n_i \sigma_{adi}^m}, \sigma_{adi} = K_\sigma \sigma_{ai} + \varphi_\sigma \sigma_{mi}$ (1-1-16)		
双向稳定变应力	塑性材料	疲劳强度	$S_{ca} = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \geq S$ (1-1-17)	
		静强度	$S_{ca} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_{\max}^2 + 4\tau_{\max}^2}} \geq S$ (1-1-18)	
	脆性材料	$S_{ca} = \frac{S_\sigma S_\tau}{S_\sigma + S_\tau} \geq S$ (1-1-19)		

注：单向应力中的 σ 可表示拉、压或弯曲应力，受扭转时，把式中 σ 改为 τ 。

(3) 单向不稳定变应力时的疲劳强度计算 不稳定变应力可分为规律性的和非规律性的两大类。非规律性的不稳定变应力应根据大量的试验，求得载荷及应力的统计分布规律，然后用统计疲劳强度的方法进行处理。规律性的不稳定变应力应根据疲劳损伤积累假说(常称为Miner法则)进行处理，其数学表达式为

$$\sum_{i=1}^z \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1-1-20)$$

利用上式疲劳损伤效应相等原则，可将规律性的不稳定变应力转换成某一等效的稳定变应力 σ_{ca} ，然后按稳定变应力进行强度计算，其计算公式见表1-1-2。

(4) 双向稳定变应力疲劳强度计算 在弯、扭复合变应力下工作的零件，其双向应力状态的计算安全系数公式见表1-1-2。式中的 S_σ 、 S_τ 为单向应力状态的计算安全系数值。双向应力状态的计算安全系数公式虽然是在对称循环复合应力情况下推导出的，但考虑到非对称循环应力可以转化为等效的对称循环应力，所以也可用于非对称循环复合应力的情况，即可作为一般双向稳定变应力的计算公式。

1.1.5 机械零件的接触疲劳强度

机械零件的表面强度分为挤压强度和接触强度，前者为面接触，零件表面之间相对静止；后者为点或线接触，零件表面之间有相对运动，相应的接触应力是循环变应力，因而称为接触疲劳强度。在接触变应力作用下，零件表面将发生疲劳点蚀，这是齿轮、滚动轴承等零件的主要失效形式。

对于线接触,由弹性力学可知,接触面的最大接触应力为

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\frac{F}{B} \left(\frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2} \right)}{\pi \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (1-1-21)$$

式中, F 为作用于接触面上的总压力; B 为初始接触线长度; ρ_1 和 ρ_2 分别为零件 1 和零件 2 初始接触处的曲率半径,通常令 $\frac{1}{\rho_\Sigma} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}$, 称为综合曲率,其中正号用于外接触,负号用于内接触; μ_1 和 μ_2 分别为零件 1 和零件 2 材料的泊松比; E_1 和 E_2 分别为零件 1 和零件 2 材料的弹性模量。式(1-1-21)即为著名的赫兹公式。

1.2 复习思考题

1-1 根据零件的断裂断口,如何识别它是疲劳断裂还是静力断裂?

答: 疲劳断裂断口有明显的光滑疲劳发展区与粗糙断裂区,并且在初始裂纹源区有放射条纹,如图 1-1-2 所示。静力断裂断口是粗糙的,没有光滑区和放射条纹。

1-2 说明疲劳曲线适用的范围和解决的问题。当应力循环次数 $N < 10^4$ 时,疲劳曲线是否还适用? 为什么? 这种情况应如何处理?

答: 疲劳曲线适用于低工作应力(接近或超过 σ_{-1} , 小于 σ_s)、高循环次数($N \geq 10^4$)的机械零件设计。它是为了解决在某一应力比 r 下不同应力循环次数试件材料的疲劳极限。

当应力循环次数 $N < 10^4$ 时,疲劳曲线已不再适用。原因是疲劳极限将增大到屈服点或超过屈服点,这时可按静强度问题来处理。

1-3 试举例说明什么零件的疲劳破坏属于低周疲劳破坏,什么零件的疲劳破坏属于高周疲劳破坏。

答: 零件上的应力接近屈服极限,疲劳破坏发生在应力循环次数 $10^3 \sim 10^4$ 时,零件破坏断口处有塑性变形的特征,这种疲劳破坏称为低周疲劳破坏,如飞机起落架、火箭发射架中零件的疲劳破坏。

零件上的应力远低于屈服极限,疲劳破坏发生在应力循环次数大于 10^4 时,零件破坏断口处无塑性变形的特征,这种疲劳破坏称为高周疲劳破坏,如一般机械上的齿轮、轴承、螺栓等通用零件的疲劳破坏。

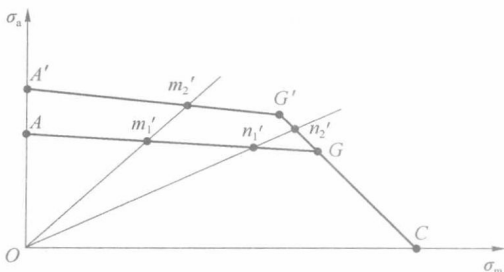


图 1-1-6 零件和材料试件的等寿命疲劳曲线的区别

1-4 零件的等寿命疲劳曲线与材料试件的等寿命疲劳曲线有何区别? 在相同的应力变化规律下,零件和材料试件的失效形式是否总是相同的? 为什么?

答: 两者的区别在于零件的等寿命疲劳曲线相对于材料试件的等寿命疲劳曲线下移了一段距离(不是平行下移)。在相同的应力变化规律下,两者的失效形式并不总是相同的,如图 1-1-6 中 n_1' 和 n_2' 点,这是由于综合影响系数 K_σ (或 K_τ) 的