

预应力技术及自紧技术

张政寿 编著
高幼良 审校

兵器工业出版社

预应力技术及自紧技术

张政寿 编著
高幼良 审校



兵器工业出版社

内容简介

本书用深入浅出的手法,系统地介绍了预应力技术和自紧技术的主要原理及实际应用。全书共分13章,第1至5章,为金属材料力学性能和基本力学知识及公式;第6章为厚壁圆筒屈服前的应力、应变计算;第7、8两章为理想和强化两种塑性材料液压自紧的计算;第9章为机械自紧的计算;第10章为自紧厚壁圆筒表面加工和不连续对应力分布和强度的影响;第11章为断裂力学在自紧厚壁圆筒上的应用;第12章为液压、机械和爆炸自紧工艺简要叙述;第13章为复合筒的设计和计算。

本书的特点是理论分析上的系统性和在工程实践上的实用性。从事一般机械工程并具有一定力学知识的科技人员,不用参考其它书籍,应用本书中的计算公式和图表就能解决实际问题。本书适合于具有中等以上文化程度的科技人员应用和参考,也可作为大专院校有关专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

预应力技术及自紧技术/张政寿,高幼良编著. —北京:
兵器工业出版社,1996
ISBN 7-80132-013-1

I. 预… I. ①张… ②高… III. 预应力技术 IV. TU75 7.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 06449 号

兵器工业出版社出版发行
(北京市海淀区车道沟10号)
各地新华书店经销
北京怀柔燕文印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 39.25 字数: 1073.44 千字
1997年1月第1版 1997年1月第1次印刷
印数: 1—500 定价: 68.00 元

前 言

在机械设计制造中采用预应力技术来增强结构件强度和疲劳寿命已有多年历史,特别是自紧技术的应用对承受特高压力的容器、特种用途厚壁圆筒的紧凑设计,材料合理利用,构件疲劳寿命的提高等又大大推进了一步。自紧技术也是一种预应力技术,但它在制造工艺方面,比外加构件获得预应力简单,故近几十年来在火炮、核反应堆、化工高压容器、反应器、高压管道等方面,得到了广泛应用。由于自紧和高强度材料的应用,所以必须对疲劳寿命、断裂力学以及应力集中、应力腐蚀等问题进行分析、计算、实验。本书在这方面专辟一章予以介绍。

用高压液体进行自紧的方法称液压自紧。这种自紧技术的历史可追溯到本世纪初,但它真正得到应用还是在近二三十年。它是在世界科学技术、工艺、材料等高速发展,特别是电子计算机及控制技术的应用推动下的产物。最近十多年来又发展了机械自紧方法,它比液压自紧工艺更简单、安全、便于生产;但机械自紧的理论研究尚处于初期阶段,很多计算参数来自于实验结果,或者来自液压自紧公式的计算。目前,这两种自紧方法,在我国均已得到应用。

我国自紧技术的应用起步较晚,在这方面系统完整的文献资料不多,过去见到的多属论文和零星的翻译资料。从事实际技术工作的工程技术人员,从这些零星资料中,很难获得一个较完整的自紧技术和预应力技术概念,要灵活应用这门技术就更难了。

本人在近 50 年技术工作生涯中,接触到自紧技术的实际应用也只有近十多年历史;在工作中,深知科技人员在遇到自紧问题时没有充裕时间去查找和翻阅零星的资料,有的科技人员甚至感到自紧技术高深莫测;有的技术人员则回避问题,将这门技术干脆委于他人处理;因此深感编著一本循序渐进,简明易懂,较全面、系统介绍这方面知识的书籍实为必要。

自紧技术也是一种预应力技术。它的开发受筒紧(复合筒)技术的启发。为使技术融通,本书取名为预应力技术和自紧技术,书中最后一章对复合筒技术作了简要介绍,但全书重点是自紧技术。

本人是一个从事实际机械工程的科技人员,在接触到的自紧工作中注意收集了国内外有关资料和实验数据,根据自己的经验和体会,从工程应用角度出发编著了这本书,这只是一个大胆的尝试,希望它的出版,能对从事国防工业、化学工业工作的科技人员在设计和制造中有所裨益。

本书在编著过程中,得到兵器工业总公司科技委、军品局、兵科院,火炮处、计划处、综合技术处等单位及有关领导的大力支持,并得到内蒙古第二机械制造总厂领导和科技委的大力支持以及王淑芳同志的协助,在此对他们表示衷心的感谢。

由于本人理论水平有限,错误在所难免,望读者提出宝贵意见并予以指正。

编著者 199408

常用符号说明

一个同样符号有几个含义的,以(1),(2),…分开注明。

(A)英文字母

a ——(1)自紧后内膛半径加工余量;(2)裂纹深度(长度)

A ——面积

A_0 ——原面积

b ——(1)自紧后外表半径加工余量;(2)裂纹宽度;(3)晶粒间距

B ——鲍辛格效应系数

c ——裂纹长度

C ——(1)常数;(2)积分常数

d ——(1)厚壁圆筒任意(可变)直径;(2)身管口径

d_i ——厚壁圆筒自紧毛坯内直径

d_o ——厚壁圆筒自紧毛坯外直径

e ——应变偏量

e_{ij} ——应变偏张量

E ——纵向拉伸弹性模数,或杨氏弹性模数,简称弹性模数

f ——(1)摩擦系数;(2)函数

G ——剪切弹性模数

G' ——能量释放率

h ——挤扩头校正段宽度

I ——应变不变量

I_1 ——应变一次不变量

I_2 ——应变二次不变量

I_3 ——应变三次不变量

I' ——应变偏量不变量

I'_1 ——应变偏量一次不变量

I'_2 ——应变偏量二次不变量

I'_3 ——应变偏量三次不变量

J ——(1)应力不变量;(2) J 积分

J_1 ——应力一次不变量

J_2 ——应力二次不变量

J_3 ——应力三次不变量

J' ——应力偏量不变量

J'_1 ——应力偏量一次不变量

J'_2 ——应力偏量二次不变量

J'_3 ——应力偏量三次不变量

K ——(1)积变模数;(2)材料断裂强度因子;(3)应力集中系数
 K_I, K_{II}, K_{III} ——I、II、III型裂纹应力强度因子
 K_{Ic} ——张开型(I型)裂纹断裂韧性
 K_t ——理论应力集中系数
 K_f ——疲劳应力集中系数
 l ——比例系数
 L ——长度
 m ——(1)修正系数(1.08~1.1547);(2)材料强化力度系数;(3)幂数;(4)复合筒层数
 M ——(1)材料强化性能系数($M=0\sim1$);(2)力偶
 n ——(1)序号;(2)幂数
 p ——(1)压应力
 p_i ——内压应力
 p_o ——外压应力
 $[p]$ ——临界压力
 $[p_i]$ ——屈服极限内压力
 $[p_o]$ ——屈服极限外压力
 $[p_i]_o$ ——有外压时的屈服极限内压力
 $[p_i]$ ——全屈服临界压力
 $[p_m]$ ——产生反向屈服临界压力
 p_{os} ——过应变百分数
 P ——外力(拉力或压力)
 P_{BE} ——内膛永久扩大百分比
 P_{ER} ——永久扩大比
 r ——任意半径、可变半径
 r_i ——自紧毛坯内半径
 r_o ——自紧毛坯外半径
 r_c ——复合筒共轭半径
 r_{ij} ——自紧毛坯加工后的内、外半径
 R ——挤扩头外半径
 S ——安全因素
 S_{ij} ——应力偏张量
 t ——(1)原壁圆筒壁厚($t=r_o-r_i$);(2)时间
 T ——温度
 u ——径向位移
 u_{er_o} ——自紧厚壁圆筒外半径径向位移
 u_{pr_i} ——自紧厚壁圆筒内半径径向位移
 U ——能量
 v ——运动速度

V ——体积

w ——(1)自紧毛坯任意(可变)半径(直径)比 $r/r_i(d/d_i)$

w_o ——自紧毛坯外内半径(直径)比,又称壁厚比 $r_o/r_i(d_o/d_i)$

w_1 ——自紧加工后成品半径(直径)比 $r_o/r_{i1}(d_{o1}/d_{i1})$

w_2 ——自紧加工外表面后半径(直径)比 $r_{o1}/r_i(d_{o1}/d_i)$

w_3 ——自紧加工内膛后半径(直径)比 $r_o/r_{i1}(d_o/d_{i1})$

w_n ——复合筒第 n 层筒半径(直径)比 $nr_o/nr_i(nd_o/nd_i)$

W ——复合筒总半径(直径)比 $mr_o/1r_i(md_o/1d_i)$

(B)希腊文字母

α ——(1)挤扩头楔入角;(2)弹性加载线 E 的倾角;(3)线膨胀系数;(4) I 型裂纹形状因子

β ——(1)挤扩头释放角;(2) I 型裂纹形状因子

γ ——(1)剪应变;(2) III 型裂纹形状因子;(3)材料表面能

γ_{ij} ——剪应变张量

$\bar{\gamma}$ ——相当剪应变,等效剪应变

δ ——(1)机械自紧半径过盈量;(2)裂纹张开位移;(3)材料伸长率

δ_c ——临界裂纹张开位移

δ_t ——总伸长率

Δ ——直径过盈量

ϵ ——应变

ϵ_{ij} ——应变张量

ϵ_{ij}^e ——弹性应变张量

ϵ_{ij}^p ——塑性应变张量

ϵ_m ——平均正应变

ϵ_v ——积应变

$\bar{\epsilon}$ ——相当应变,等效应变

ϵ ——真实(瞬时)伸长率

ξ ——系数

η ——系数

θ ——角度

Θ ——3 向应力之和 ($\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ 或 $\sigma_\theta + \sigma_r + \sigma_z$)

λ ——拉麦常数

μ ——材料泊松比

μ_σ ——应力罗地参数

μ_ϵ ——应变罗地参数

ν ——系数

π ——(1)圆周率;(2) π 平面

ρ ——厚壁圆筒弹塑面交界半径

目 录

第1章 绪 论	(1)
§ 1.1 预应力和残余应力	(1)
§ 1.2 软性系数 χ	(1)
§ 1.3 弹性模数	(2)
§ 1.3.1 弹性变形及其物理本质	(2)
§ 1.3.2 广义胡克定律	(3)
§ 1.3.3 弹性模数的技术应用	(3)
§ 1.3.4 影响弹性模数的因素	(4)
§ 1.4 静拉伸下的力学性能试验	(5)
§ 1.4.1 比例极限 σ_p	(7)
§ 1.4.2 弹性极限 σ_e	(7)
§ 1.4.3 屈服极限 σ_s	(9)
§ 1.4.4 伸长率和断面收缩率	(11)
§ 1.4.5 形变硬化(强化)问题	(14)
§ 1.4.6 强度极限 σ_b	(17)
§ 1.4.7 实际断裂强度 σ_{tt}	(18)
§ 1.5 鲍辛格效应	(21)
§ 1.6 拉伸—压缩循环加载	(25)
§ 1.7 高温力学性能	(26)
§ 1.7.1 蠕变现象	(26)
§ 1.7.2 蠕变曲线	(27)
§ 1.7.3 蠕变极限与持久强度	(28)
§ 1.7.4 应力松弛	(29)
§ 1.7.5 应力松弛与蠕变的关系	(30)
§ 1.8 应力—应变曲线在塑性部分的特点	(31)
§ 1.8.1 加载和卸载规律	(31)
§ 1.8.2 应力与应变之间不是单值关系	(31)
§ 1.9 静水压力试验	(31)
§ 1.10 基本假设	(32)
§ 1.11 对单向应力情况的简化模型	(33)
第2章 应力分析	(35)
§ 2.1 外力和内力	(35)
§ 2.2 应力概念	(35)
§ 2.3 单向应力状态	(36)
§ 2.4 双向应力状态	(37)
§ 2.4.1 只有两个相互垂直方向上的拉应力或压应力 σ_x, σ_y	(37)

§ 2.4.2	纯剪应力	(38)
§ 2.4.3	一般情况	(39)
§ 2.5	三向应力状态	(43)
§ 2.5.1	只有三个垂直方向上的拉应力或压应力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	(43)
§ 2.5.2	一般情况	(45)
§ 2.5.3	三向主应力的应力圆图	(46)
§ 2.6	应力张量及不变量	(48)
§ 2.6.1	应力张量	(48)
§ 2.6.2	应力张量不变量	(49)
§ 2.7	应力的分解及应力偏张量不变量	(51)
§ 2.8	应力空间及 π 平面	(55)
§ 2.9	平衡微分方程式	(57)
§ 2.10	坐标变换	(59)
第 3 章	弹性应变	(62)
§ 3.1	位移与应变	(62)
§ 3.2	应变张量、主应变及应变不变量	(65)
§ 3.3	应力与应变之间的常数	(70)
§ 3.3.1	纵向弹性模数 E	(70)
§ 3.3.2	剪切弹性模数 G	(71)
§ 3.3.3	积变模数 K	(72)
§ 3.3.4	拉麦常数 λ	(72)
§ 3.4	应力与应变间的关系	(73)
§ 3.4.1	以应力表示应变	(73)
§ 3.4.2	以应变表示应力	(76)
§ 3.5	坐标变换	(77)
§ 3.6	弹性应变能	(78)
§ 3.6.1	外力为拉力或压力的应变能	(78)
§ 3.6.2	外力为剪力的应变能	(79)
§ 3.6.3	一般情况	(79)
§ 3.7	应变圆	(81)
§ 3.7.1	平面应变	(81)
§ 3.7.2	三向主应变的应变圆	(82)
§ 3.8	应变的实验方法	(82)
§ 3.8.1	直角形应变花	(84)
§ 3.8.2	等角形应变花	(84)
§ 3.8.3	双直角形应变花	(86)
§ 3.8.4	直角-三角形应变花	(87)
第 4 章	失效理论	(90)
§ 4.1	材料失效的含义	(90)

§ 4.2	最大正应力理论	(91)
§ 4.3	最大正应变理论	(92)
§ 4.4	最大剪应力理论	(94)
§ 4.5	最大变形能理论	(96)
§ 4.6	最大应变能理论	(100)
§ 4.7	内摩擦理论	(101)
§ 4.8	应用各种理论计算结果的比较	(103)
第5章	塑性状态下的基本理论	(105)
§ 5.1	绪言	(105)
§ 5.2	塑性应力应变关系	(105)
§ 5.3	加载方式与加载、卸载准则	(106)
§ 5.3.1	加载方式	(106)
§ 5.3.2	加载、卸载准则	(107)
§ 5.4	强化模型	(109)
§ 5.4.1	等向强化模型	(109)
§ 5.4.2	随动强化模型	(110)
§ 5.4.3	混合强化模型	(112)
§ 5.5	德鲁克强化理论	(113)
§ 5.5.1	塑性应变增量矢量的方向	(114)
§ 5.5.2	屈服面必须是处处外凸的	(115)
§ 5.6	增量理论	(115)
§ 5.6.1	塑性位势理论	(115)
§ 5.6.2	理想塑性材料的本构关系——应力应变关系	(117)
§ 5.6.3	强化材料的本构关系	(122)
§ 5.7	全量理论	(129)
§ 5.7.1	简单加载,单一曲线假定	(129)
§ 5.7.2	依留申小变形理论	(130)
§ 5.7.3	亨斯基理论	(131)
§ 5.7.4	那达依理论	(132)
§ 5.8	增量理论与全量理论的比较	(135)
§ 5.8.1	理论分析	(135)
§ 5.8.2	实验研究	(135)
§ 5.8.3	汇总比较表	(136)
§ 5.9	增量理论与全量理论的具体应用	(138)
§ 5.9.1	按增量理论求解	(138)
§ 5.9.2	按全量理论求解	(141)
第6章	厚壁圆筒加载时屈服前的应力、应变及位移	(142)
§ 6.1	与计算有关的各种状态和条件	(142)
§ 6.1.1	厚壁圆筒受载荷前后情况	(142)

§ 6.1.2	边界条件	(142)
§ 6.1.3	材料压缩性	(144)
§ 6.1.4	材料失效条件	(144)
§ 6.2	一般情况	(144)
§ 6.3	开端条件下的应力、应变及位移	(148)
§ 6.3.1	只有内压 p_i 的情况	(149)
§ 6.3.2	只有外压 p_o 的情况	(154)
§ 6.4	闭端条件下的应力、应变及位移	(154)
§ 6.4.1	只有内压 p_i 的情况	(155)
§ 6.4.2	只有外压 p_o 的情况	(155)
§ 6.5	固定端条件下的应力、应变及位移	(156)
§ 6.5.1	只有内压 p_i 的情况	(156)
§ 6.5.2	只有外压 p_o 的情况	(157)
§ 6.6	公式汇总表	(157)
第 7 章	理想弹塑性材料厚壁圆筒的屈服及弹塑性状态	(160)
§ 7.1	弹性屈服极限压力	(160)
§ 7.1.1	弹性屈服极限内压 $[p_i]$	(160)
§ 7.1.2	弹性屈服极限外压	(162)
§ 7.1.3	开端条件各种失效理论的弹性屈服极限内压	(165)
§ 7.1.4	开端条件,各种失效理论,受内外压时 厚壁圆筒弹性屈服极限压力 $[p_i]$	(166)
§ 7.2	受内压加载时弹塑性厚壁圆筒的应力、应变及位移	(168)
§ 7.2.1	弹性区 ($\rho \leq r \leq r_o$)	(169)
§ 7.2.2	塑性区 ($r_i \leq r \leq \rho$)	(171)
§ 7.3	受内压厚壁圆筒无反向屈服时卸载和残余应力、应变及位移	(182)
§ 7.3.1	弹性区 ($\rho \leq r \leq r_o$)	(183)
§ 7.3.2	塑性区 ($r_i \leq r \leq \rho$)	(186)
§ 7.4	受内压厚壁圆筒有反向 屈服时卸载和残余应力、应变及位移	(188)
§ 7.4.1	反向屈服与鲍辛格效应	(188)
§ 7.4.2	非反向屈服区 ($\rho' \leq r \leq r_o$) 卸载时的应力、应变及位移	(193)
§ 7.4.3	非反向屈服区 ($\rho' \leq r \leq r_o$) 的残余应力、应变及位移	(194)
§ 7.4.4	反向屈服区 ($r_i \leq r \leq \rho'$) 卸载时的应力、应变及位移	(195)
§ 7.4.5	反向屈服区 ($r_i \leq r \leq \rho'$) 残余应力、应变及位移	(197)
§ 7.5	自紧时产生反向屈服的条件	(199)
§ 7.6	最佳自紧	(202)
§ 7.6.1	合成应力 σ_c	(202)
§ 7.6.2	等效应力 $\bar{\sigma}$	(211)
§ 7.6.3	最佳自紧参数的确定	(218)

§ 7.6.4	允许的自紧压力 p_{ap}	(223)
§ 7.6.5	考虑安全因素 s 时任意自紧情况下允许的工作压力 p_{wp}	(226)
§ 7.6.6	自紧压力与厚壁圆筒外径处应变间的关系	(227)
§ 7.6.7	计算程序方框图	(236)
§ 7.6.8	计算举例	(246)
§ 7.7	厚壁圆筒自紧后承载能力的提高	(250)
§ 7.7.1	以自紧厚壁圆筒最大弹性承载压力与未自紧厚壁 圆筒的弹性屈服极限内压作比较	(250)
§ 7.7.2	以常用的自紧厚壁圆筒承载能力与未自紧厚壁圆筒 的弹性屈服极限内压作比较	(252)
§ 7.8	自紧度、内膛永久扩大百分比、永久扩大比	(253)
§ 7.8.1	自紧度	(253)
§ 7.8.2	内膛永久扩大百分比	(259)
§ 7.8.3	永久扩大比	(260)
§ 7.9	计算举例	(264)
第 8 章	强化弹塑性材料厚壁圆筒的弹塑性状态分析	(274)
§ 8.1	基本方程式	(274)
§ 8.2	问题的简化	(276)
§ 8.3	弹塑性加载时的应力、应变及位移	(277)
§ 8.3.1	弹性区 ($\rho \leq r \leq r_o$)	(277)
§ 8.3.2	塑性区 ($r_i \leq r \leq \rho$)	(278)
§ 8.4	无反向屈服时卸载及残余应力、应变及位移	(281)
§ 8.4.1	卸载的应力、应变及位移	(281)
§ 8.4.2	卸载后残余应力、应变及位移	(283)
§ 8.5	有反向屈服时的弹塑性卸载	(286)
§ 8.5.1	非反向屈服区 ($\rho' \leq r \leq r_o$) 卸载时的应力、应变及位移	(286)
§ 8.5.2	反向屈服区 ($r_i \leq r \leq \rho'$)	(287)
§ 8.6	有反向屈服时卸载后的残余应力、应变及位移	(290)
§ 8.6.1	弹性区 ($\rho \leq r \leq r_o$)	(291)
§ 8.6.2	中间区 ($\rho' \leq r \leq \rho$)	(291)
§ 8.6.3	反向屈服区 ($r_i \leq r \leq \rho'$)	(292)
§ 8.7	不发生反向屈服的临界自紧压力及临界条件	(294)
§ 8.8	反向屈服区半径 ρ' 的求解	(299)
§ 8.9	强化系数对应力的影响	(305)
§ 8.9.1	强化系数 M 、 m 对反向屈服区界面半径 ρ' 数值的影响	(305)
§ 8.9.2	强化系数 M 、 m 及 ρ' 对周向残余应力的影响	(317)
§ 8.10	强化弹塑性材料厚壁圆筒公式与理想弹塑性厚壁圆筒公式间的关系	(329)
§ 8.10.1	无反向屈服时	(329)
§ 8.10.2	有反向屈服时	(330)

§ 8.11 计算举例	(332)
§ 8.11.1 弹塑性厚壁圆筒情况	(332)
§ 8.11.2 全塑性厚壁圆筒情况	(333)
§ 8.11.3 计算结果	(334)
第9章 机械自紧	(344)
§ 9.1 受力模型分析	(344)
§ 9.1.1 挤扩头形状	(344)
§ 9.1.2 挤扩时厚壁圆筒受力和变形情况	(345)
§ 9.2 厚壁圆筒应力分析计算	(347)
§ 9.2.1 基本公式	(347)
§ 9.2.2 加载应力	(348)
§ 9.2.3 卸载应力	(351)
§ 9.2.4 残余应力	(352)
§ 9.3 位移和应变计算	(357)
§ 9.3.1 加载位移和应变	(357)
§ 9.3.2 卸载回弹量公式	(359)
§ 9.3.3 残余位移	(360)
§ 9.3.4 过盈量分析	(365)
§ 9.3.5 厚壁圆筒外表面应变和弹塑性区界面处半径的关系	(372)
§ 9.3.6 厚壁圆筒毛坯尺寸和过应变百分数的确定	(373)
§ 9.4 挤扩头推力计算	(373)
§ 9.4.1 挤扩头推力与过盈量间的关系	(378)
§ 9.4.2 挤扩头推力与过应变百分数间的关系	(381)
§ 9.4.3 挤扩头推力与半径比间的关系	(383)
§ 9.4.4 挤扩头推力与前锥角间的关系	(383)
§ 9.4.5 挤扩头推力与摩擦系数间的关系	(383)
§ 9.5 格拉汉—克拉克对机械自紧残余应力的研究	(385)
§ 9.5.1 假设条件	(385)
§ 9.5.2 应力	(386)
§ 9.5.3 试验实例	(389)
§ 9.5.4 分析意见和结论	(392)
§ 9.5.5 周向残余应力比较	(394)
§ 9.6 讨论	(396)
第10章 自紧厚壁圆筒切削加工及不连续性对应力场的影响	(397)
§ 10.1 自紧厚壁圆筒内外表面均匀切削加工后的残余应力	(397)
§ 10.1.1 自紧厚壁圆筒内外表面情况	(397)
§ 10.1.2 自紧厚壁圆筒内外表面加工后求新残余应力的基本假设	(398)
§ 10.1.3 计算用公式	(399)
§ 10.1.4 无反向屈服厚壁圆筒按先外后内的加工顺序	(401)

§ 10.1.5	无反向屈服厚壁圆筒按先内后外的加工顺序	(403)
§ 10.1.6	有反向屈服厚壁圆筒按先外后内的加工顺序	(405)
§ 10.1.7	有反向屈服厚壁圆筒按先内后外的加工顺序	(406)
§ 10.1.8	讨论	(408)
§ 10.2	厚壁圆筒自紧后加工内外表面对承载能力的影响	(415)
§ 10.2.1	理论分析	(415)
§ 10.2.2	试件准备	(416)
§ 10.2.3	试验程序	(416)
§ 10.2.4	数据分析	(416)
§ 10.2.5	未加工厚壁圆筒的承载能力	(417)
§ 10.2.6	加工外表面	(418)
§ 10.2.7	加工内表面	(421)
§ 10.2.8	计算结果汇总和结论	(422)
§ 10.3	镗削法测量自紧厚壁圆筒的残余应力	(424)
§ 10.3.1	镗削法测量残余应力的理论根据	(424)
§ 10.3.2	实验数据举例	(426)
§ 10.4	圆环切口法测量自紧厚壁圆筒残余应力和过应变百分数	(430)
§ 10.4.1	圆环切口法测量的理论根据	(430)
§ 10.4.2	圆环切口法实验	(437)
§ 10.5	自紧厚壁圆筒钻横孔对应力场的影响	(439)
§ 10.5.1	计算的理论根据	(439)
§ 10.5.2	计算举例	(439)
§ 10.5.3	讨论	(444)
§ 10.6	自紧厚壁圆筒铣缺口时对应力场的影响	(445)
§ 10.6.1	厚壁圆筒内的弹性热应力场	(445)
§ 10.6.2	用热应力场模拟部分自紧厚壁圆筒的残余应力	(445)
§ 10.6.3	厚壁圆筒内部有切槽的残余应力分布	(452)
§ 10.6.4	厚壁圆筒外表有切槽的残余应力分布	(454)
第 11 章	工程断裂力学在自紧厚壁圆筒上的应用	(462)
§ 11.1	裂纹	(462)
§ 11.1.1	裂纹的定义	(462)
§ 11.1.2	裂纹分类	(462)
§ 11.1.3	裂纹对材料强度的影响	(463)
§ 11.2	线弹性断裂力学	(465)
§ 11.2.1	能量释放率断裂理论	(465)
§ 11.2.2	应力强度因子断裂理论	(466)
§ 11.2.3	G' 与 K 的关系	(468)
§ 11.2.4	裂纹尖端小范围屈服及修正	(468)
§ 11.2.5	工程构件应力强度因子 K_I 的确定	(470)

§ 11.3 弹塑性断裂力学..... (471)

 § 11.3.1 裂纹张开位移理论..... (472)

 § 11.3.2 J 积分..... (472)

§ 11.4 疲劳现象..... (473)

 § 11.4.1 疲劳裂纹的形成..... (473)

 § 11.4.2 裂纹扩展..... (474)

 § 11.4.3 疲劳裂纹扩展速率..... (478)

 § 11.4.4 应变疲劳..... (481)

 § 11.4.5 疲劳寿命估算..... (482)

§ 11.5 应力腐蚀..... (484)

 § 11.5.1 腐蚀机理..... (485)

 § 11.5.2 裂纹处的应力腐蚀..... (485)

 § 11.5.3 K_{Isc} 及 da/dt (486)

§ 11.6 应力集中..... (486)

 § 11.6.1 疲劳应力集中系数 K_f (486)

 § 11.6.2 缺口应力的牛柏分析..... (487)

 § 11.6.3 彼得森估算 K_f 的缺口敏感性曲线..... (488)

§ 11.7 厚壁圆筒裂纹的应力强度因子 K_I (489)

 § 11.7.1 有关公式..... (490)

 § 11.7.2 应力强度因子的叠加法..... (491)

 § 11.7.3 应力强度因子 $K_{IR}(K_{IA})$ 的有关数据..... (494)

§ 11.8 自紧厚壁圆筒外表面切槽的疲劳寿命预测..... (498)

 § 11.8.1 疲劳寿命预测程序..... (498)

 § 11.8.2 疲劳寿命预测结果..... (501)

 § 11.8.3 讨论..... (501)

§ 11.9 自紧厚壁圆筒裂纹的影响和疲劳寿命..... (502)

 § 11.9.1 多裂纹的影响..... (502)

 § 11.9.2 具有直前裂纹厚壁圆筒疲劳寿命的计算和模拟试验..... (513)

 § 11.9.3 一种简化的厚壁圆筒疲劳寿命预测方法..... (517)

 § 11.9.4 美国华特夫里特兵工厂对 175mmM113 型加农炮炮身脆性断裂事故的试验研究和改进措施..... (520)

第 12 章 自紧工艺..... (546)

 § 12.1 构件材料的力学性能试验..... (546)

 § 12.1.1 构件在常温环境下工作..... (546)

 § 12.1.2 构件在高温环境下工作..... (546)

 § 12.2 自紧毛坯的设计..... (546)

 § 12.2.1 按工作压力计算零件安全因素和理论自紧长度..... (546)

 § 12.2.2 确定毛坯的实际自紧长度..... (547)

 § 12.2.3 确定成品的过应变百分数..... (547)

§ 12.2.4	计算毛坯的过应变百分数	(548)
§ 12.2.5	计算毛坯的自紧压力	(548)
§ 12.2.6	计算半径过盈量 δ 和推力 P	(548)
§ 12.2.7	自紧毛坯内外径的确定	(549)
§ 12.2.8	自紧毛坯自紧前后的处理	(549)
§ 12.3	密封结构	(549)
§ 12.3.1	产品密封结构	(549)
§ 12.3.2	工艺密封结构	(553)
§ 12.4	液压自紧	(555)
§ 12.4.1	工艺方法	(555)
§ 12.4.2	液压介质	(557)
§ 12.4.3	液压自紧场地	(557)
§ 12.4.4	液压自紧设备	(557)
§ 12.5	机械自紧	(557)
§ 12.5.1	机械自紧工艺方式的选择	(557)
§ 12.5.2	机械自紧身管工序的编制	(559)
§ 12.5.3	润滑问题	(559)
§ 12.5.4	自紧工序操作、检验和事故处理	(560)
§ 12.5.5	机械自紧设备	(561)
§ 12.5.6	机械自紧工装	(564)
§ 12.5.7	橄榄形挤扩头的应力分析	(567)
§ 12.6	爆炸自紧	(575)
§ 12.6.1	爆炸自紧的一般情况	(575)
§ 12.6.2	缩小尺寸的模拟试验	(575)
§ 12.6.3	105mm 身管的全尺寸试验	(577)
§ 12.6.4	爆炸自紧原理在火炮生产中的具体应用	(578)
§ 12.6.5	结论	(578)
第 13 章	复合筒	(580)
§ 13.1	厚壁圆筒的应力情况	(580)
§ 13.2	提高厚壁圆筒承载能力的理论依据	(581)
§ 13.3	2 层复合筒的紧缩量 and 套合压力	(582)
§ 13.3.1	产生套合压力的方法	(582)
§ 13.3.2	紧缩量 and 套合压力 (无内压 p_i)	(584)
§ 13.4	2 层复合筒的优化设计	(587)
§ 13.4.1	不同材料、不同屈服极限, 内筒为空心筒	(587)
§ 13.4.2	不同材料、同样屈服极限, 内筒为空心筒	(588)
§ 13.4.3	同样材料、同样屈服极限, 内筒为空心筒	(588)
§ 13.4.4	同样材料、同样屈服极限, 内筒为实心轴	(588)
§ 13.4.5	同样材料、不同屈服极限, 内筒为空心筒	(589)