

锅炉及 压力容器 受压元件强度

蒋智翔 杨小昭 编著

机械工业出版社

锅炉及压力容器受压元件强度直接关系到设备的安全性和经济性。因此,世界各国都制订了强制性标准。清华大学蒋智翔、杨小昭两教授长期从事该领域的研究和教学,并参与了我国标准的制订,对于标准的阐释,他们是绝对权威。此书填补了我国这类图书长期断档的空白,既介绍国外强度计算标准,又落实贯彻我国标准。其内容包括受压元件材料的力学性能、典型受压元件应力及稳定性分析、典型受压元件的强度计算和受压元件应力及强度分析的一般方法等四大部分。

本书可供锅炉及压力容器行业工程技术人员、劳动监察部门的检验人员、大专院校相应专业师生使用,也可作培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

DU46/27/12

锅炉及压力容器受压元件强度/蒋智翔,杨小昭编著.

—北京:机械工业出版社,1999.7

ISBN 7-111-07158-1

I. 锅… II. ①蒋… ②杨… III. ①锅炉-受压元件-强度
②压力容器-受压元件-强度 IV. TK225

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第09689号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王霄飞 版式设计:霍永明 责任校对:姚培新

封面设计:姚毅 责任印制:何全君

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999年7月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·27印张·654千字

0 001—3000册

定价:43.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

序

《锅炉及压力容器受压元件强度》一书是一本既有理论分析又有工程设计应用的好书，具有很高的学术水平及实用价值。它的内容包括了材料性能、应力计算理论、标准分析以及近代应力及强度分析方法。本书问世一定会对锅炉及压力容器的安全性起到重要作用。

编者在写作中考虑到，虽然由于锅炉与压力容器的具体工作条件不同，国内外都分别对锅炉及压力容器制订了专用的受压元件强度计算标准，但就受压元件的受力及强度分析而言，它们之间有很多共同点，所基于的理论基础基本上是相同的。针对此特点，编者在系统地阐述了受压元件受力及强度分析基本理论基础上，介绍了我国不同强度计算标准的具体规定，且与国外强度计算标准的相应规定进行了分析比较，使读者能较系统地掌握受压元件强度分析的基本方法，同时了解不同强度标准的特点，对提高读者的受压元件强度分析水平会有很大的帮助。

此外，锅炉及压力容器受压元件强度问题涉及到的学科领域很多，同时随着科学技术的发展，很多近代的理论及分析方法，例如应力分类法、断裂力学、有限单元法及实验应力分析等，逐渐推广应用于受压元件的强度计算。本书的内容中详细讨论了受压元件强度计算标准各项规定所基于的理论及试验基础，同时介绍了这些近代理论及分析方法的发展情况。对于从事锅炉及压力容器工作的工程技术人员了解这些内容，对正确全面地解决受压元件的强度计算问题是很重要的。

编者长期从事锅炉及压力容器强度的研究工作，在固体力学及锅炉设计方面具有很高的理论造诣及丰富的实践经验，曾多次获得我国部委颁发的科技进步奖及国家专利。编者曾参加了我国水管锅炉受压元件强度计算标准的制订，与美国机械工程师协会 ASME 标准委员会有密切的联系，培训了我国第一批具有 ASME 授权资格的检验师。在编写此书的过程中，编者阅读了大量文献资料，总结了长期的工作成果。在内容安排及编写方面由浅入深，既注意到基本内容的分析过程，又尽可能地避免繁琐的数学推导；既有深入的理论分析，又兼顾到实际应用。故此书不但适用于我国从事锅炉及压力容器的工程技术人员，也可作为大专院校热能及化工容器专业学生以及培训班学员的参考教材。

劳动部锅炉压力容器检测研究中心

高级技术顾问、教授 李毅

前 言

锅炉及压力容器受压元件的强度问题是锅炉及压力容器设计、制造及运行中的一个关键问题。它直接关系到设备的安全性及经济性。因此,世界各国都制订了具有强制性的受压元件强度计算标准,在设计、制造、检验及运行时必须遵照执行。一般来说,为了便于应用,受压元件强度计算标准中的计算公式都较为简单,但都规定了公式的适用范围,或在受压元件的结构上加以一定的限制。作为从事锅炉及压力容器的技术人员,不但需要确切地掌握受压元件强度计算标准的各项规定,而且应了解这些规定所基于的理论及试验基础,以及它们的适用范围,这样才能正确地应用这些规定进行受压元件的强度计算。本书的主要内容是针对我国锅炉及压力容器受压元件强度计算标准中的一些主要计算公式及规定,阐述它们所基于的理论及试验基础,同时结合目前受压元件强度计算的发展方向,简要介绍一些近代的理论及计算方法。

本书具体内容包括以下四个部分:

第一篇——受压元件材料的力学性能:本篇中除了阐述目前受压元件强度计算标准中作为强度计算依据的常温及高温静荷下的力学性能外,还介绍了钢材的疲劳强度性能及断裂力学基于理论,为较全面地了解受压元件材料的力学性能提供必要的知识。

第二篇——典型受压元件应力及稳定性分析:本篇的内容主要是为第三篇中讨论典型受压元件强度提供必要的理论基础。阐述了轴对称变形旋转薄壳的薄膜理论及弯曲理论、轴对称变形薄板的弯曲理论、承受外压时的稳定理论以及厚壁元件、热应力等问题的分析方法。

第三篇——典型受压元件的强度计算:本篇中较详细地阐述我国锅炉及压力容器受压元件强度计算标准中,对一些主要元件规定的强度计算方法及它们的适用范围,并且从它们所基于的理论及试验基础的角度进行分析讨论。此外,还介绍了国外一些强度计算标准的特点与我国的强度计算标准进行比较。

第四篇——受压元件应力分析的一般方法:本篇中简要地介绍了实验应力分析方法及有限单元法的基本原理,为分析形状及受力状态较复杂的受压元件的应力分布提供了初步的理论基础。

锅炉及压力容器受压元件强度问题是一个很复杂的问题,涉及到很多学科领域。本书中不可能对这些问题都进行详细的阐述。为了使设计人员便于阅读及使用,本书中除了对于一些最基本的内容进行较详细的推导外,其它内容都在分析讨论基础上给出所得的结论,以避免繁琐的数学推导。读者需要了解详细的分析过程时可参阅有关的专著。正式发表的资料已列于本书的参考文献中。

本书适用于从事锅炉及压力容器的设计、制造、运行、安全监察及强度试验的技术人员,也可作为高等院校热能及化工容器专业学生强度课程的教材。

由于编者的水平所限,本书中不可避免地会存在一些不足之处,希读者给予指正。

编 者

1998年8月

常用符号一览表（除特殊说明外）：

一般物理量

A	面积
δ	厚度
L, l	元件长度
D, d	元件直径
R, r	元件半径
T	热力学温度
t	温度 (°C)
τ	时间
w	元素的质量分数，下标为元素符号

钢材力学性能

σ_p	比例极限
σ_s	屈服强度（屈服点）
$\sigma_{0.2}$	条件屈服强度
σ_b	抗拉强度
E	弹性模量
μ	泊松比
α	线膨胀系数
δ	延伸率（断后伸长率）
ψ	断面收缩率
a_K	冲击初度
σ'_r	以允许的稳态阶段蠕变速率 ν 规定的条件蠕变极限
$\sigma'_{\epsilon/r}$	以蠕变应变 ϵ 规定的条件蠕变极限
σ'_r	高温持久强度极限
N	交变应力循环次数
r	交变应力循环的应力比
σ_a	交变应力循环的应力幅
σ_m	交变应力循环的平均应力
σ_r	试样的疲劳极限
σ_{rN}	寿命 N 的条件疲劳极限
K_I	I 型断裂形式的应力强度因子
K_{IC}	I 型断裂形式的断裂韧度
a	裂纹特征长度
$\bar{\delta}$	裂纹顶端张开位移
δ_c	临界裂纹尖端张开位移
J	裂纹尖端附近应力场的 J 积分

J_{IC} I 型断裂形式的临界 J 积分值

应力分析物理量

p	压强
p_k	稳定临界压强
w	位移
θ, ϕ	转角
σ	正应力
τ	切应力
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
σ_d	当量应力
σ_k	稳定临界应力
$[\sigma]$	元件许用应力
ϵ	线应变
γ	切应变
N	轴向力
T	切向力
Q	横向力
M	弯矩
M_k	扭矩
U	应变能
V_P	力 P 的势能
V_ϵ	总势能
D	薄壳或薄板的抗弯刚度
I	杆件的横截面惯性矩
β	容器外径与内径之比
$[d]$	不需加强的单孔的最大允许开孔直径
ν_h	焊缝减弱系数
ν_d	孔桥当量减弱系数
$\nu_{\min}$	最小减弱系数
t	孔间距
t_0	孔间互不影响间距
C	元件附加壁厚 ($C=C_1+C_2+C_3$)
C_1	考虑腐蚀减薄的附加壁厚
C_2	考虑钢板及钢管负偏差的附加壁厚
C_3	考虑工艺减薄的附加壁厚

R	电阻	w —外壁处；	p —中心面处（平均值）
n	光线折射率	壁厚；	
m	光学试验中的条纹级数	δ —元件名义壁厚或取用壁厚；	
在应力、应变、内力、内力矩、位移及几何尺寸		δ_l —元件理论计算壁厚；	
符号中的下标：		δ_y —元件有效壁厚；	
θ —环向；	ϕ —经向；	$\delta_{\min}$ —元件最小需要壁厚；	
r —径向；	n —内壁处；	δ_0 —无孔及无焊缝时元件的理论计算壁厚	

目 录

序 前言

第一篇 受压元件材料的力学性能

第一章 受压元件钢材常温静荷下的力学性能..... 1	第二节 常温时的高周疲劳 35
第一节 钢材力学性能的基本指标 1	第三节 常温时的低周疲劳 43
第二节 钢材的脆化 12	第四节 高温疲劳 49
第二章 受压元件钢材高温静荷下的力学性能 19	第五节 热疲劳 53
第一节 钢材短期高温力学性能 19	第四章 受压元件钢材的裂纹扩展及脆性断裂准则 55
第二节 蠕变及应力松弛现象 21	第一节 线弹性脆性断裂准则 56
第三节 蠕变极限及持久强度极限 26	第二节 弹塑性脆性断裂准则 65
第三章 受压元件钢材的疲劳强度 33	第三节 蠕变条件下的裂纹扩展 71
第一节 概述 33	第四节 疲劳条件下的裂纹扩展 74

第二篇 典型受压元件应力及稳定性分析

第五章 概述..... 79	第四节 轴对称变形扁球薄壳的内力及变形 118
第一节 受压元件的结构及受力特点 79	第五节 轴对称变形圆环薄壳的内力及变形 122
第二节 受压元件的内力及应力 80	第八章 开孔薄壳结构的应力分析..... 128
第六章 轴对称变形旋转薄壳的薄膜理论..... 82	第一节 平板在平面内受力时开孔附近处的应力集中 128
第一节 旋转薄壳的几何特征 82	第二节 开孔球壳的应力分析 131
第二节 轴对称变形旋转薄壳的薄膜内力 83	第三节 开孔椭球壳的应力分析 138
第三节 轴对称变形旋转薄壳的薄膜位移 88	第四节 开孔圆柱壳的应力计算公式 140
第四节 薄膜理论的适用范围 93	第九章 轴对称变形薄圆板及椭圆薄板的弯曲理论..... 146
第七章 轴对称变形旋转薄壳的弯曲理论..... 96	第一节 轴对称变形实心薄圆板的应力及变形 146
第一节 轴对称变形圆柱薄壳的简单边界效应弯曲理论 96	第二节 轴对称变形空心薄圆板的应力及变形 151
第二节 轴对称变形旋转薄壳的简单边界效应 104	第三节 具有平封头受压元件的受力分析 156
第三节 几何不连续轴对称变形旋转薄壳的局部应力 107	第四节 椭圆薄板的应力及变形 161

第五节 弹性基础上薄圆板的应力及变形	162	内压时的临界压力	190
第十章 厚壁受压元件的应力及变形	165	第十二章 受压元件的热应力分析	192
第一节 厚壁圆筒的应力及变形	165	第一节 热应力的特点及类型	192
第二节 厚壁球形容器的应力及变形	169	第二节 热应力的基本分析方法	193
第三节 组合圆筒的应力分析	171	第三节 非均匀的温度场时细长杆件的热应力	196
第十一章 承受外压受压元件的稳定性分析	177	第四节 温度沿壁厚变化时厚壁圆筒的热应力	199
第一节 平衡的稳定性	177	第五节 温度沿壁厚变化时厚壁球形容器的热应力	203
第二节 中心受压杆件的临界载荷	180	第六节 轴对称温度场下圆平板的热应力	205
第三节 承受外压圆环的临界压力	184	第七节 轴对称温度场下圆柱薄壳的热应力	207
第四节 承受外压圆柱壳的临界压力	185		
第五节 某些其它形状元件在承受外压或			
第三篇 典型受压元件的强度计算			
第十三章 受压元件的许用应力及取用壁厚	212	第一节 不需加强的单孔的最大允许开孔直径	268
第一节 材料许用应力	212	第二节 孔的加强计算	271
第二节 安全系数	214	第三节 被孔排减弱的圆筒体的强度计算	286
第三节 受压元件许用应力及取用壁厚	218	第十七章 封头及管板的强度计算	300
第十四章 受压元件强度的控制准则	222	第一节 凸形封头的强度计算	301
第一节 强度理论	222	第二节 锥形封头的强度计算	313
第二节 极限应力法及极限载荷法	227	第三节 平封头的强度计算	319
第三节 应力分类法	236	第四节 管板的强度计算	323
第十五章 无开孔圆筒形元件的强度计算	246	第五节 法兰的强度计算	330
第一节 承受内压圆筒形元件的强度计算	246	第十八章 受压元件外载荷附加应力的校核计算	338
第二节 承受内压圆筒形元件的计算公式的适用范围	249	第一节 锅炉受压元件重量载荷附加应力校核计算	338
第三节 承受外压圆筒形元件的强度及稳定性计算	258	第二节 卧式容器重量载荷附加应力校核计算	342
第十六章 开孔减弱圆筒形元件的强度计算	268	第三节 直立式容器外载荷附加应力校核计算	348
		第四节 火力发电厂汽管道外载荷附加应力校核计算	352

第四篇 受压元件应力分析的一般方法

第十九章 实验应力分析方法	356	第六节 试验结果误差分析及数据 整理	387
第一节 静态电测应变测量的 基本原理	356	第二十章 有限单元法	394
第二节 特殊条件下的静态电测 应变测量	363	第一节 概述	394
第三节 平面模型光弹性试验方法	369	第二节 弹性理论基础知识	397
第四节 光弹性贴片法	379	第三节 有限单元法的基本原理 及应用	407
第五节 云纹法	382	参考文献	417

第一篇 受压元件材料的力学性能

第一章 受压元件钢材常温静荷下的力学性能

受压元件一般来说是在高温、高压的条件下工作的，有的还承受疲劳载荷的作用。其工作介质也是各式各样的，例如锅炉受压元件的介质为汽水混合物或过热蒸汽，化工及石油压力容器介质往往具有较强的腐蚀性。在设计计算时需要根据不同类型受压元件的具体工作条件，考虑各种因素对材料的影响，选择合适的钢材并确定许用应力。

本章首先讨论受压元件钢材在常温静荷下的力学性能。钢材的力学性能与它的微观组织有密切的关系，但在强度计算时一般只考虑钢材的宏观力学性能指标。本章及以后几章在讨论钢材的力学性能时，主要介绍它们的宏观性能，不着重讨论微观组织的机理，只是在分析外界因素对钢材宏观力学性能的影响时，在必要的情况下，从钢材的微观组织的角度进行一些简要的讨论。

第一节 钢材力学性能的基本指标

在经典的受压元件强度计算中，一般都根据钢材的强度指标确定受压元件的许用应力，而将塑性指标及韧性指标作为选择钢材类型的依据。钢材的强度指标、塑性指标及韧性指标是根据单向拉伸试验及冲击弯曲试验确定的。

一、单向拉伸试验

单向拉伸试验是确定钢材力学性能最广泛使用的基本试验。它所要求的设备较简单，且易于得到可靠的试验数据，故一般制造厂及检验所都以单向拉伸试验作为检验钢材力学性能的主要手段。

进行单向拉伸试验时，将试样安装在拉力机或万能试验机上，使试样承受从零缓慢增加的静载荷的作用，直至破坏。一般试验机都是通过使试样产生变形而对试样施加载荷的，同时利用附加的测力装置测量出试样在一定变形时所需施加的载荷值。因此，在试验过程中，实际上是控制试样的变形速度而保证静载荷加载，也就是说，单向拉伸试验所得到的数据是钢材在变形速度很小的条件下的力学性能。

为了排除试样的尺寸及形状对试验数据的影响，在进行单向拉伸试验时必须将试样加工成按国家标准规定的标准试样。一般采用如图 1-1 所示的圆柱试样及平板试样两种形式的标准试样。标准试样由测试段、过渡段及夹持段所组成。测试段是测量试验数据的主要部位，形状是等截面的，长度与试样横截面尺寸的比值必须满足如图 1-1 所示的要求，且表面要求加工至一定的精度，以排除表面粗糙度对试验结果的影响。过渡段必须按规定有适当的过渡圆角，

以降低应力集中,使试样不会在过渡段断裂。夹持段是与试验机夹具的连接部分,它的长度及横截面尺寸按试验机的要求确定,以能传递试样所需施加的载荷。

进行单向拉伸试验时,按一定的间隔测量出试样测试段的变形 Δl 及其对应的载荷 P 。将所的试验数据绘制在 $P-\Delta l$ 坐标内,即可得试样的载荷与变形关系曲线。一般试验机上都配置有自动绘图装置,可直接绘制出载荷与变形的关系曲线。由于自动绘图装置中所测出的变形包括了过渡段的变形,所得的曲线仅能用于确定材料的强度指标及定性分析材料的变形能力,要确切地测量试样测试段的变形,必须采用专用的引伸计。

若将载荷——变形曲线的变形坐标 Δl 除以试样测试段的初始长度 l_0 ,将曲线的载荷 P 坐标除以试样横截面的初始面积 A_0 即可得到以轴向线应变 $\epsilon = \Delta l / l_0$ 及轴向应力 $\sigma = P / A_0$ 为坐标的拉伸应力——应变曲线(简称拉伸曲线)。

钢材试样的拉伸曲线一般来说可分为下列四个阶段,如图 1-2 所示。

1. 弹性阶段 ($O-B_2$)

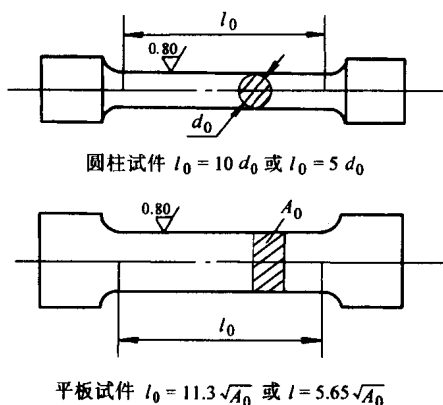


图 1-1

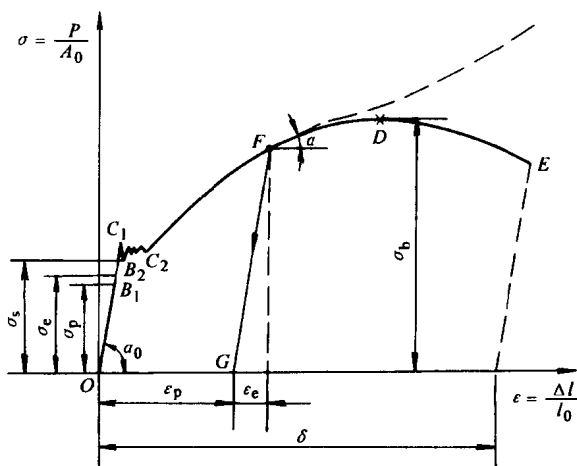


图 1-2

在此阶段试样处于弹性变形状态,即若试样所承受的应力在这个范围内时,卸去载荷后,试样仍恢复至初始的尺寸,没有出现残余变形。 B_2 点的应力称为材料的弹性极限 σ_e 。在弹性阶段中 OB_1 段为一直线, B_1 点的应力称为材料的比例极限 σ_p 。当应力小于比例极限 σ_p 时,应力与应变间呈线性关系,即

$$\sigma = E\epsilon \quad (1-1)$$

式中, E 称为材料的弹性模量。式 (1-1) 称为材料在单向应力状态下的虎克定律 (Hooke's Law)。它表征着材料对弹性变形的抵抗能力。 E 值愈大,在同样应力的作用下所产生的变形愈小。对于钢材, $E = (2.0 \sim 2.1) \times 10^5 \text{ MPa}$ 。不同化学成分钢材的弹性模量,数值变化不显著,是个较为稳定的物理参数。由图 1-2 可看出,弹性模量 E 等于 OB_1 线的斜率,即 $E = \tan \alpha_0$ 。 OB_1 线愈陡,表示材料的弹性模量愈大。

钢材的弹性极限 σ_e 与比例极限 σ_p 一般是很接近的,故在工程中往往不严格区分两者的区别,近似地认为在弹性范围内材料服从虎克定律,应力与应变间呈线性关系。在弹性范围内材料的变形量很小,低碳钢的弹性极限 σ_e 约为 200MPa,高强度合金钢的 σ_e 一般也不大于 1000MPa,由式 (1-1) 可知弹性极限时的应变约为 (0.1~0.5)%。所以在对受压元件进行弹

性范围内的应力分析时，一般认为元件的变形属于“小变形”的范畴，可忽略变形对初始尺寸的影响，仍根据元件的初始尺寸分析计算，使分析过程大为简化。

2. 流动（屈服）阶段（ B_2-C ）

当应力超过弹性极限后，材料将逐渐减小对继续变形的抵抗能力。至 C_1 点后，拉伸曲线的形状为一带有微小颤动的水平线，如图 1-2 所示。因此可以认为在 C_1C_2 段时材料已完全丧失了抵抗继续变形的能力，即增大试样的变形并不需要增加应力。此时的应力称为材料的屈服点或屈服强度 σ_s 。对于碳素钢，屈服阶段的变形量可达 $(2\sim3)\%$ 。

若采用表面抛光的平板试样进行拉伸试验，在屈服阶段试样表面上会出现与试样轴线大致成 45° 角的细条纹，如图 1-3 所示。由材料力学的应力分析可知，在单向应力状态时最大切应力发生在 45° 的斜

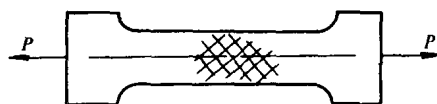


图 1-3

截面上，故产生材料屈服现象的原因是由于试样所承受的最大切应力超过了材料的切断抗力，在最大切应力作用面上相互搓动所造成的。屈服强度实质上是以正应力表达的材料切断抗力。

3. 强化阶段（ $C-D$ ）

当变形超过流动阶段后，材料又恢复了对继续变形的抵抗能力，即欲使试样继续变形，必须增加应力的数值，但在此阶段时材料对继续变形的抵抗能力要比弹性阶段小很多。由图 1-2 可看出， CD 段曲线的切线斜率 $\tan\alpha$ 比弹性阶段的 $\tan\alpha_0$ 要小很多。 CD 段的最高点处的应力称为材料的抗拉强度 σ_b 。它是材料均匀变形时的最大抗力。它所对应的载荷 $P_b = \sigma_b A_0$ 是试样所能承受的最大载荷。

4. 颈缩阶段（ $D-B$ ）

应力到达抗拉强度 σ_b 时，试样开始出现局部横截面收缩的非均匀变形现象。这种现象称为颈缩现象，如图 1-4 所示。在图 1-2 所示的拉伸曲线上，此阶段的应力数值反而下降，似乎应力减小能使试样继续变形似的。产生此现象的原因是图 1-2 中的应力 σ 是按初始面积 A_0 计算出的。它实际上只反映试样继续变形所需载荷的大小。由于局部横截面收缩，而横截面的收缩速度大于需要此部位材料继续变形的应力增长率，故试样所承受的载荷值反而下降。若以收缩的横截面的面积 A 计算试样的应力值，即 $\sigma_t = P/A$ （ σ_t 称为真应力）， $\sigma_t - \epsilon$ 曲线将如图 1-2 中虚线所示。可以看出，真应力 σ_t 是随着变形的增加而不断增大的。

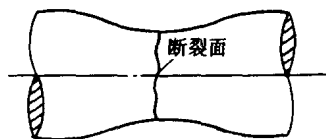


图 1-4

到达 E 点后，试样在缩颈处沿横截面断裂。应该注意，颈缩阶段试样的变形已不再能表征材料在单向拉伸时均匀变形的情况，试样已处于非均匀变形状态。在颈缩区域，试样的形状已成为一变截面杆件，各点的材料并不处于单向应力状态，故从缩颈处的破坏现象不能说明试样在单向应力状态时是沿横截面断开的。

上述的流动、强化及颈缩三个阶段可以统称为塑性阶段。其与弹性阶段的区别是塑性阶段卸载后试样不能再恢复至初始的尺寸，存在着残余变形。例如，若在试样承载至图 1-2 中的 F 点时，将载荷卸去，此时试样的应力—应变卸载曲线并不沿原来的加载路径 $FC_2C_1B_2B_1O$ 恢复至 O 点，而是沿着与弹性阶段的直线 OB_1 相平行的路径 FG 卸载至 G 点。因此当载荷全部卸掉后，试样将存在着残余应变 ϵ_p 。由此可见，当加载至塑性阶段时，试样的应变由下列两部分所组成：1) 弹性应变 $\epsilon_e = \sigma/E$ ，它在卸载时将消除；2) 塑性应变 ϵ_p ，它在卸载后仍保留

在试样上，成为残余应变。

上面介绍的由四个不同阶段所组成的拉伸应力——应变曲线是最为一般的情况。退火或回火的低碳钢及某些中碳钢的拉伸曲线全部包含此四个阶段，但其他钢材（高强度钢，合金钢等）的拉伸应力——应变曲线并不全部包含此四个阶段。在塑性阶段不存在明显的流动阶段，在破坏前也不出现颈缩现象，拉伸应力——应变曲线基本上由弹性阶段及强化阶段所组成（见图 1-5）。由于强化阶段对变形的抵抗能力要比弹性阶段小很多，为了防止产生较大的塑性变形，在工程设计计算中对于这类材料，一般规定以产生 0.2% 残余变形的应力作为材料的条件屈服强度，以 $\sigma_{0.2}$ 表示。利用塑性阶段的卸载规律可以测定出条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的数值。以横坐标上的 $\epsilon = 0.2\%$ 点 D 为起点，作一与弹性阶段直线 OB 相平行的斜直线 DC （图 1-6）。此直线与拉伸曲线的交点 C 的纵坐标值即为材料的条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 。

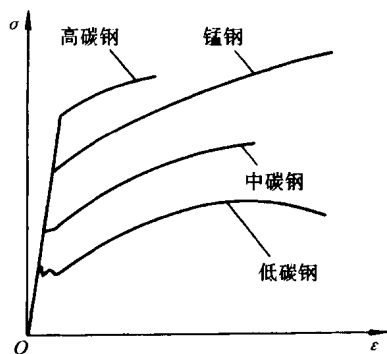


图 1-5

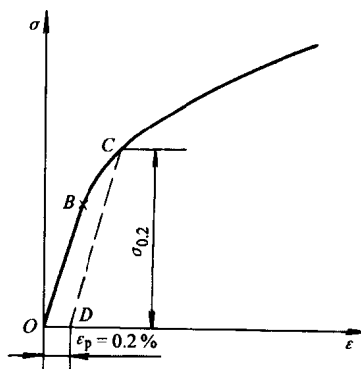


图 1-6

通过单向拉伸试验及所得到的拉伸应力——应变曲线可以得到表征材料力学性能的特征值——强度指标及塑性指标。

强度指标是指材料所能承受的最大应力。它是工程设计计算时控制元件强度的重要依据。在拉伸试验中可得到下列两种强度指标：

1. 屈服强度 σ_s 或条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$

当应力到达屈服强度 σ_s 或条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 时，材料并没有发生破坏，但已丧失了（对有明显流动阶段的材料）或显著地减弱了（对无明显流动阶段的材料）抵抗继续变形的能力。也就是说，与弹性阶段相比较，只需增加很小的应力或甚至不增加应力，材料即能继续变形。从抵抗继续变形能力的角度来说，材料已处于“危险”状态。它将使所设计的元件处于不正常工作状态。因此在工程设计计算中，对于具有较大塑性变形能力的材料，将屈服强度 σ_s 或条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 作为控制元件静荷强度的主要指标。

2. 抗拉强度 σ_b

抗拉强度 σ_b 是一个很直观的材料处于“危险”状态的强度指标。它能很方便地由拉伸试验测定出，甚至不必绘制出材料的拉伸曲线也能在从试验机直接读出试样所能承受的最大载荷，从而求出抗拉强度 σ_b 的数值。因此，在早期的设计计算中，都是以抗拉强度 σ_b 作为控制元件强度的依据。但对于具有较大塑性变形能力的材料，以屈服强度 σ_s 或条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 作为强度指标，已足以控制元件的强度，以抗拉强度 σ_b 作为强度指标既无必要，也无实际意义。由第十三章第一节的讨论可知，目前国内外的锅炉及压力容器受压元件强度计算标准中仍以

抗拉强度 σ_b 作为强度指标的主要原因是用其间接地控制元件的脆性断裂。此外, 对于低碳钢材料, 由于屈服强度 σ_s 与抗拉强度 σ_b 存在着一定的关系, 为了便于测量, 有时也以抗拉强度 σ_b 作为控制元件强度的指标。

塑性指标是指材料在破坏前的塑性变形能力, 即材料在产生了多大的塑性变形后才发生破坏。在拉伸试验中可得到下列两种塑性指标:

1. 断后伸长率 (或称为延伸率)[⊖] δ

它的定义为

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, l_0 为试样测试段的初始长度; l_k 为试样破坏后测试段的长度。延伸率 δ 实际上表示试样破坏时的残余 (塑性) 应变 (见图 1-2)。显然, δ 值愈大, 材料塑性变形的能力也愈大, 或者说塑性愈好; 反之, δ 值愈小, 材料的塑性愈差或材料愈脆。应该指出, 对于有颈缩阶段的材料, 按式 (1-2) 计算出的延伸率 δ 中包含了试样均匀变形阶段 ($\sigma \leq \sigma_b$ 时) 的塑性变形及非均匀变形阶段 ($\sigma > \sigma_b$) 的塑性变形, 而后者实质上并不能表征材料在单向拉伸应力状态时材料的塑性变形能力。但由于精确地测量试件均匀变形阶段的长度需要特殊的测量装置, 在一般的工程设计中采用规定试样尺寸的比值 $\sqrt{A_0}/l_0$ 的方法以控制非均匀塑性变形的影响。

由实验数据可知, 颈缩阶段非均匀塑性变形的应变值与试样尺寸的比值 $\sqrt{A_0}/l_0$ 有关。 $\sqrt{A_0}/l_0$ 值愈大, 非均匀塑性变形的应变也愈大。国内外的试验标准中, 一般都规定标准试样的 $\sqrt{A_0}/l_0$ 为 11.3 及 5.65 两个数值 (见图 1-1)。对于圆柱形标准试样, 相当于 $l_0/d_0 = 10$ 及 5 (d_0 为试样测试段的直径)。上述两种标准试件的延伸率是不同的, $\sqrt{A_0}/l_0 = 5.65$ 的短标准试样的延伸率 δ_5 大于 $\sqrt{A_0}/l_0 = 11.3$ 的长标准试样的延伸率 δ_{10} 。一般来说, $\delta_5 = (1.2 \sim 1.5) \delta_{10}$ 。由于短标准试样可以节约原材料且加工较方便, 目前各国标准中有优先采用短标准试件的延伸率 δ_5 的趋势, 我国的水管锅炉受压元件强度计算标准中也已采用 δ_5 作为材料的延伸率。

2. 断面收缩率 ψ

它的定义为

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中, A_k 为破坏处的横截面面积。对于没有颈缩阶段的钢材, 断面收缩率 ψ 与延伸率 δ 间理论上存在着下列关系:

$$\delta = \psi / (1 - \psi) \quad (1-4)$$

故采用延伸率 δ 或断面收缩率 ψ 来评价塑性变形能力是同样的。但对于有颈缩阶段的钢材, $\psi > \delta_0$ 颈缩程度愈厉害, 两者的差值愈大。此外, 前面已指出延伸率的数值与试样的尺寸比值 $\sqrt{A_0}/l_0$ 有关, 同时延伸率对试样测试段的加工质量较为敏感, 横截面微小的不均匀性将使颈

⊖ 本书中延伸率是指拉伸试样试验段的断后伸长率。

缩阶段提早出现,降低延伸率的数值,而这类因素对断面收缩率基本上是没有影响的。因此,总的来说采用断面收缩率评价材料的塑性变形能力应该比延伸率更为优越些,但由于历史上形成的习惯,目前仅在压力加工等领域中采用断面收缩率作为材料的塑性指标,在受压元件的强度计算标准中大部分仍采用延伸率作为材料的塑性指标。

在对受压元件进行强度计算时,材料的许用应力是将强度指标除以一定的安全系数确定的。强度指标愈高,许用应力也愈高。故工程设计人员对强度指标 σ_s (或 $\sigma_{0.2}$) 及 σ_b 的数值是很重视的。塑性指标 δ 及 ψ 并不反映在许用应力中,好像塑性指标与强度计算无关似的,因此往往容易被忽视。实际上塑性指标对元件的安全性是非常重要的。首先,由塑性指标较高的材料制成的元件不容易产生脆性破坏,在破坏前元件将出现较大的塑性变形,与塑性指标很低的脆性材料相比较有较大的安全性。其次,在受压元件的强度计算标准中,很多公式是根据元件的极限状态得出的,而只有当材料塑性指标较高,有一定的塑性变形能力时,极限状态设计方法才是正确的(见第十四章第二节)。由脆性材料制成的元件的最大应力达到危险应力时,元件即发生破坏,故不能按极限状态原则进行设计计算。国内外很多受压元件的强度计算标准中对选用钢材的延伸率的低限值作了规定。我国水管锅炉受压元件强度计算标准中规定选用钢材的延伸率 $\delta_s \geq 18\%$ 。

最后应该指出,材料的塑性变形能力并不是材料的固有特征。它与温度、加载速度及受力状况都是有关的。塑性指标 δ 及 ψ 只能表示材料在单向拉伸受力状态时的塑性变形能力。材料的受力状态不同,塑性变形能力也不相同,例如当元件内存在裂纹时,在裂纹尖端处材料处于三向拉伸状态。即使延伸率很高的钢材(单向拉伸时有很好的塑性变形能力)在这种受力状态下塑性变形能力将急剧地降低,导致材料发生脆性破坏。温度、加载速度等因素对材料塑性变形能力的影响将在后面有关章节中专门讨论(见第二章~第四章)。

二、真应力与真应变

前面曾指出,图 1-2 所示的材料拉伸应力—应变曲线的坐标都是将试样的载荷—变形曲线除以试样的初始尺寸而求得的。但是在拉伸试验过程中,试样的实际截面积及长度都是随着变形的增长而变化的,截面积不断减小,长度不断增大。因此,按初始试样尺寸确定的应力及应变只有当试样的变形很小时(例如弹性阶段及流动阶段)才能较为确切地表达试样实际的应力及应变。当试样的变形较大时,必须按试样当时的实际截面积及测试段长度才能确切地计算出试样的真应力及真应变。

设在拉伸试验中试样测试段某瞬时的截面积为 A , 则真应力为

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (1-5)$$

式中, P 为此瞬时试样所承受的载荷值。若以 λ_F 表示此瞬时的断面收缩率,即

$$\lambda_F = \frac{A_0 - A}{A_0} \quad (1-6)$$

式中, A_0 为试样横截面的初始截面积。真应力可写成

$$\sigma_t = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0(1-\lambda_F)} = \frac{\sigma}{1-\lambda_F} \quad (1-7)$$

式中, $\sigma = P/A_0$ 为名义应力。可以看出真应力 σ_t 比名义应力 σ 大至 $1/(1-\lambda_F)$ 倍。拉伸试验时随着 λ_F 的增加,两者的差别也逐渐增大。

应该注意,在颈缩阶段按式(1-7)计算出的应力值并不能确切地表达颈缩处的真应力。在

颈缩处试样的形状已不再是等截面杆，在横截面上应力并不均匀分布，而式 (1-7) 虽然考虑了截面积的变化，但所求得的仍是平均应力，没有反映出应力分布的不均匀性。

真应变的定义为在拉伸试验时某瞬时前各瞬时应变之和。将此瞬时测试段的伸长 Δl 除以该瞬时测试段的长度 l 的数值，并不能确切地表示试样此瞬时的真应变。在拉伸过程中试样的长度是不断变化的，每瞬时的相对伸长量不同。真应变的表达式为

$$e = \int_{l_0}^l dl/l = \ln(l/l_0) \quad (1-8)$$

若以名义应变 $\epsilon = \Delta l/l_0 = (l-l_0)/l_0$ 代入上式，得

$$e = \ln(1+\epsilon) \quad (1-9)$$

可以看到，试样的真应变 e 小于名义应变 ϵ 。试样的变形程度也可用真断面收缩率来度量。与真应变相似，真断面收缩率 λ_{Ff} 可按下式来计算：

$$\lambda_{Ff} = - \int_{A_0}^A dA/A = \ln(A_0/A) = \ln[1/(1 - \lambda_F)] \quad (1-10)$$

在塑性变形阶段，可认为试样的体积在变形过程中保持不变。故在均匀变形阶段 $A_0 l_0 = A l$ ，得

$$\lambda_{Ff} = \ln(l/l_0) = \ln(1+\epsilon) = e \quad (1-11)$$

因此真断面收缩率 λ_{Ff} 与真应变 e 完全相同。

式 (1-9) 及式 (1-11) 只适用于均匀变形阶段。在颈缩阶段，沿测试段长度变形不均匀，故必须测量出颈缩处的变形情况，才能确切地计算出试样最大的真应变。图 1-7 为 $\omega_0 = 0.05\%$ 碳钢的名义应力 σ 与名义应变 ϵ 关系曲线与试样颈缩处真应力 σ_t 与真应变 e 关系曲线间的对比情况。图中 OD 及 OD' 为均匀变形阶段的曲线，可以看到试样所承受的真应力 σ_t 大于名义应力 σ 。随着应变增加，两者的差别也增大。真应变 e 增加率小于名义应变 ϵ 的增加率，故抗拉强度 σ_b 处 (D 点) 的名义应变 ϵ_D 大于此时相应的真应变 e_D 。在非均匀变形的颈缩阶段 (DE 段及 $D'E'$ 段)，应变增长率的情况刚好相反，真应变的增长率远远大于名义应变的增长率。断裂时的真应变 e_E 几乎等于名义应变 ϵ_E 的 3 倍。由真应力——真应变曲线还可看出，颈缩阶段的真应变要比强化阶段的真应变大很多，约为强化阶段真应变的 5 倍左右，且颈缩阶段的真应力——真应变曲线为一斜直线。

图 1-7 中的 BD 段及 BD' 段为均匀塑性变形阶段的曲线。实验结果表明，此阶段的真应力——真应变曲线在双对数坐标内为一斜直线，如图 1-8 所示。故它的曲线方程式可用下式表示：

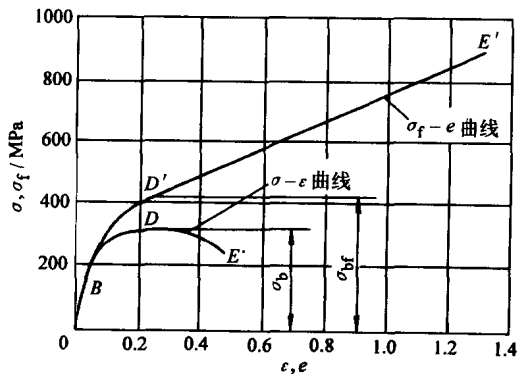


图 1-7

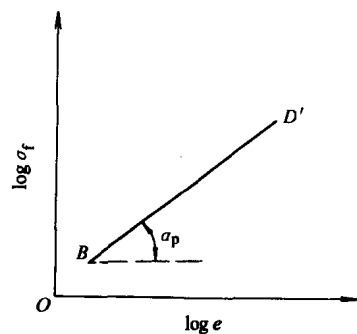


图 1-8

$$\lg \sigma_t = \lg \sigma_{f0} + n \lg e$$

或

$$\sigma_t = \sigma_{f0} e^n \quad (1-12)$$

式中, σ_{f0} 为真应变 $e=1$ 时的真应力值; n 称为材料的应变硬化指数, $n = \tan \alpha_p$ (α_p 为直线 BD' 的倾斜角)。它表征在均匀塑性变形阶段材料的变形强化能力。在研究塑性材料制成的受压元件的极限承载能力及破坏载荷时, 应变硬化指数 n 是材料很重要的物理参数之一。对于具有颈缩阶段的材料, 应变硬化指数 n 与试样开始发生颈缩时的真应变值有关。在单向拉伸应力状态时, 试样开始发生颈缩时的真应变值即等于 n 值; 对于承受内压的圆筒形元件 (主应力比值为 2:1 时), 开始发生颈缩的环向真应变为 $n/2$; 对于承受内压的圆球形元件 (主应力比值为 1:1 时), 开始发生颈缩的环向真应变为 $n/3$ 。

三、冲击韧性

材料的韧性是指材料在破坏前所能吸收塑性变形能量的能力。材料在变形过程中将在材料的内部储藏一定数量的应变能。在弹性阶段时卸去载荷后, 试样恢复至初始尺寸, 应变能也全部释放出来。若加载至塑性阶段再卸去载荷, 试样则不能完全地恢复至初始尺寸, 出现残余变形。与此相对应, 加载时储藏在试样内部的应变能也不能全部释放出来, 对应于残余变形的应变能储藏在试样内。由材料的拉伸应力—应变曲线 (图 1-9) 可看出, 当试样断裂后, 单位体积材料所储藏的应变能为曲线下的面积 $ODEE'$ 。显然, 屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b 及延伸率 δ 愈大, 面积 $ODEE'$ 也愈大, 即材料的韧性愈好。由此可知, 材料的韧性综合反映了强度指标及塑性指标的大小, 可用以评价材料吸收塑性变形能量的能力。对于承受冲击载荷作用的元件, 材料的韧性是材料性能的重要指标。

材料的拉伸曲线形状与加载速度有关。要精确测定材料的动态的拉伸曲线需要较复杂的仪器设备, 不便于工程应用。在工程设计中一般采用摆锤式冲击弯曲试验来测定试样破坏所需的能量, 作为衡量材料韧性的指标。

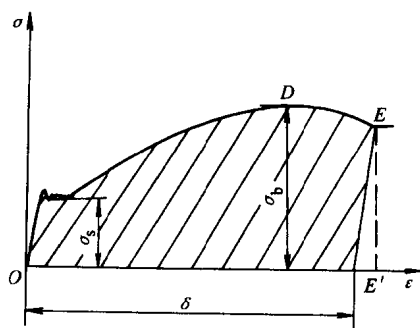


图 1-9

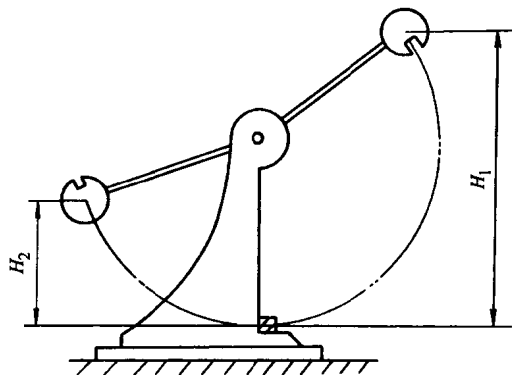


图 1-10

摆锤式冲击弯曲试验机的工作原理简图如图 1-10 所示。摆锤自高度 H_1 处自由下落, 冲击置于底端处的试样, 冲断试样后摆锤摆至高度 H_2 。因此摆锤冲断试样所消耗的能量为

$$E_k = Q(H_1 - H_2) \quad (1-13)$$

式中, Q 为摆锤的重量。显然, E_k 即为试样所能吸收的最大能量。根据试验中所测得的 E_k 值, 工程中以冲击韧性 a_k (J/mm^2) 作为评价材料韧性的参数。

$$a_k = E_k / A \quad (1-14)$$