

陶瓷的力学性质
中国科学院上海硅酸盐研究所五室 译

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海高安路六弄一号)

新华书店上海发行所发行
上海商务印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 12.875 字数 309,000

1981年6月第1版 1981年6月第1次印刷

印数: 1—2,450

书号: 15192·140 定价: 1.60 元

《科技新书目》187-141

目 录

第1章 绪论	1
1.1 本书的想法和特征	1
1.2 以陶瓷的力学性质命题的理由	3
1.3 本书内容概论	4
第2章 与陶瓷的力学性质有关的结构因子	7
2.1 固体的力学性质	7
2.1.1 应力和应变	7
2.1.2 应力-应变曲线	9
2.2 晶体的分类	10
2.2.1 按结合力性质分类	10
2.2.2 按晶格分类	11
2.3 完整晶体的强度	13
2.3.1 完整晶体的塑性变形强度	13
2.3.2 完整晶体的断裂强度	15
2.4 晶体中的缺陷和强度	17
2.4.1 裂纹型缺陷引起的应力集中	17
2.4.2 晶体位错型缺陷引起的应力集中	20
2.4.3 晶体中缺陷的数量和强度的关系	24
2.5 结束语	24
第3章 陶瓷的强度理论	26
3.1 基于裂纹型缺陷的理论(格里菲思理论)	26
3.2 基于晶体位错型缺陷的理论	29
3.2.1 仅有位错缺陷的断裂模型	30
3.2.2 晶界的影响	34
3.3 裂纹与位错共存的缺陷理论	35

3.3.1	滑移和内部缺口引起的楔型裂纹	36
3.3.2	滑移和原有的裂纹引起的新生裂纹	36
3.4	裂纹生长的必要条件	36
3.5	断裂力学的基本概念	38
3.5.1	历史背景	38
3.5.2	线性断裂力学	40
3.5.3	宏观非线性断裂力学	42
3.6	微观与宏观结合的强度和断裂力学基础	44
3.6.1	概念的必然性	44
3.6.2	历史背景	45
3.6.3	微观与宏观结合的裂纹和位错排力学	46
3.7	关于强度和断裂的各种方法论	50
3.8	结束语	50
3.9	固体断裂的随机过程论	52
3.9.1	随机过程	53
3.9.2	固体断裂随机过程的基本概念	54
3.10	从实测数值求分布函数	58
3.10.1	母体的推断	58
3.10.2	典型概率纸的应用例	59
3.11	固体断裂的速率过程论	63
3.11.1	基本概念	63
3.11.2	固体断裂的速率过程论	64
3.12	速率过程论和随机过程论	66
3.12.1	强度和断裂问题中跃迁概率的物理力学意义	66
3.12.2	分析举例	66
3.12.3	关于裂纹生长的速度过程论和随机过程论	69
3.13	结束语	69
第4章	陶瓷的显微结构与力学性质	71
4.1	陶瓷力学性质的特征与显微结构的关系	71
4.2	显微结构的研究方法	76

4.2.1	X-射线衍射法	77
4.2.2	偏光显微镜观察法	79
4.2.3	反射显微镜观察法	82
4.2.4	电子显微镜和其它测定法	85
4.3	影响模量的主要因素	86
4.4	机械强度和气孔率	88
4.5	气孔和裂纹尖端的曲率半径对强度的影响	90
4.6	气孔和裂纹大小的影响	94
4.7	晶粒大小的影响	95
4.8	晶界的影响	96
4.9	内部应力的影响	99
4.10	有玻璃相陶瓷的瓷坯强度	102
4.11	复合材料的强度	108
4.12	陶瓷的强化	113
4.13	结束语	115
第5章	玻璃的强度	118
5.1	晶体和非晶体	118
5.2	玻璃的理论强度	120
5.3	格里菲思裂纹和实用强度	122
5.4	擦伤强度	124
5.5	原生玻璃的强度	125
5.6	裂纹的伸展和断裂力学	127
5.7	静态疲劳	132
5.8	结束语	135
第6章	掌握力学性质及其评价方法	137
6.1	充分掌握力学性质	137
6.2	抗弯强度	139
6.2.1	试验方法与数据处理	139
6.2.2	强度数据的评价	143
6.2.3	高温强度	145

6.3	抗拉强度	147
6.4	抗压强度	150
6.5	压环强度	151
6.6	光弹性	153
6.6.1	应力与双折射, 光程差	153
6.6.2	晶体的双折射	155
6.6.3	偏振光及其干涉现象	156
6.6.4	光弹性实验	162
6.6.5	光弹性装置用材料	172
6.6.6	光弹性常数的测定	175
6.6.7	特殊的光弹性技术	177
6.6.8	结束语	184
6.7	摩擦和磨损与力学性质的关系	187
6.7.1	序言	187
6.7.2	磨损过程	187
6.7.3	陶瓷的摩擦和磨损	190
6.7.4	陶瓷的硬度、强度和气氛的关系	203
6.7.5	关于陶瓷摩擦磨损气氛特性的说明	205
6.7.6	高温下陶瓷的摩擦系数	206
6.7.7	结束语	206
6.8	热冲击	208
6.8.1	抗热冲击	208
6.8.2	各种理论抵抗系数	209
6.8.3	热冲击试验法	212
6.8.4	结束语	218
6.9	用超声波评价陶瓷特性	219
6.9.1	前言	220
6.9.2	声波特性、弹性常数的测定法	222
6.9.3	测量声速、弹性常数及传输损耗的例子	234
6.9.4	在高温下测定声速	237

6.9.5	陶瓷的物性与声速	230
6.9.6	用瑞利波表征表面钢化玻璃的情况	249
6.9.7	用超声波检测缺陷来管理质量和检查成品	252
6.9.8	AE 计测技术在评价陶瓷特性上的应用	257
6.9.9	铁电陶瓷的极化引起的感应的声速各向异性	260
6.9.10	用超声波评价陶瓷材料的未来	261
6.10	材料的断裂和断裂力学	263
6.10.1	格里菲思断裂理论和应力强度因子	263
6.10.2	亚临界裂纹生长和 K_I-V 曲线	263
6.10.3	K_I 和 V 的测定方法和例子	264
6.10.4	断裂力学的应用	266
6.11	陶瓷的摩擦和磨损的试验方法	270
6.11.1	前言	270
6.11.2	影响摩擦和磨损的各种因素	271
6.11.3	试验机的选择	274
6.11.4	摩擦和磨损试验的实施方法	276
6.11.5	代表性的试验装置	278
6.11.6	结束语	278
6.12	蠕变试验	293
6.12.1	前言	293
6.12.2	抗弯蠕变	295
6.12.3	抗拉蠕变	297
6.13	结束语	299
6.13.1	测定力学性质中的关键问题和数据归纳方法	299
6.13.2	试验测定值和现场数据间的差异	302
第7章	陶瓷的制造过程和强度的关系	307
7.1	陶瓷强度与工艺因素	307
7.2	烧成之前工艺的影响	310
7.2.1	原料制备过程的影响	310
7.2.2	颗粒配比的影响	313

7.2.3	干燥过程	315
7.2.4	热分解、煅烧	317
7.2.5	球磨和混合	318
7.2.6	造粒	320
7.2.7	压坯(成型方法和成型压力)	322
7.3	烧成过程的影响	323
7.3.1	固相反应	324
7.3.2	加热时间和加热温度的影响	328
7.3.3	烧结气氛的作用	328
7.3.4	热压法	328
7.3.5	添加剂的作用	329
7.3.6	烧结以后的处理	330
7.4	结束语	331
第 8 章	陶瓷疲劳寿命的预测	336
8.1	机械应力下的疲劳	336
8.1.1	静态疲劳	337
8.1.2	动态疲劳	338
8.1.3	SPT 图 (Strength-Probability-Time Diagram)	340
8.2	热应力疲劳(热疲劳)	345
8.2.1	静态热疲劳	346
8.2.2	动态热疲劳	347
8.2.3	T-SPT 图	350
第 9 章	陶瓷材料的设计	354
9.1	正在受到重视的陶瓷的力学性质	354
9.2	陶瓷何时能用作高温机械部件	356
9.3	影响陶瓷高温强度的主要因素	357
9.3.1	与高温强度有关的结构因素	358
9.3.2	显微结构与高温强度	359
9.3.3	气氛、形状的效果	363
9.4	影响陶瓷高温性能的重要因素	365

9.4.1	影响耐热冲击性的各种因素	365
9.4.2	耐热性	374
9.5	断面和材料设计	377
9.5.1	观察断面的方法	377
9.5.2	断面的一般性质	377
9.5.3	断裂源和断面	379
9.5.4	断裂源	380
9.5.5	高温断面	383
9.6	高温高强度陶瓷	386
9.7	高温高强度的必要条件	387
9.8	高温高强度材料的设计指南	388
9.8.1	氮化硅	388
9.8.2	氮化铝	393
9.9	作为高温材料的高温高强度氮化物	395
第 10 章	结束语 (摘录)	396

第1章 绪 论

1.1 本书的想法和特征

从工程学角度看陶瓷材料时,人们首先想到的是它的用途。具体地说,首先注意材料的“物性”,然后考虑它与外界条件的相互作用而出现的各种“现象”,最后联系到“用途”,作为制品出售。如以材料为中心整理这些关系,如图 1-1 所示。这样就很容易理解材料与物性、现象、用途间的密切关系。

对于从事陶瓷材料科学和技术的人来说,若以这个方法看材料,以材料为中心,从物性——现象——用途周转循环,巧妙地应用此表征(characterization)的方法,就能容易做到逐

步地改进材料,不断创造出性能更好的、稳定的制品。

若以此观点,继续写下去,自然第二个问题应该要列举一些特征。

第一,是重新考虑以往材料研究及其用途开发所采用的方

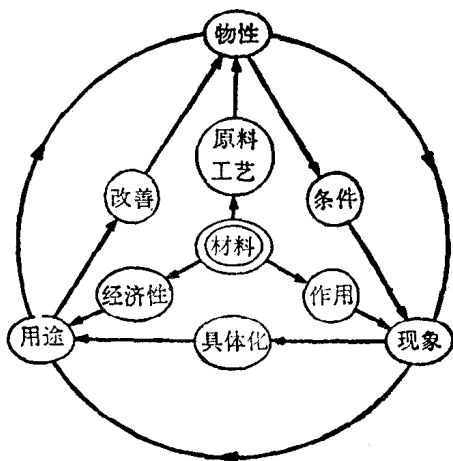


图 1-1 材料和物性、现象、用途之间的关系

法。以往开发新的制品时,往往采取满足用户需要的方法,换句话说,是用老产品制造出功能满足要求的制品为目标,创造出新材料,重点是开拓新用途。这相当于从白炽电灯到荧光灯、用晶体管代替真空管。这些都是用新材料代替已有材料性能的例子,只不过是把构成系统的一个零件换成另外的零件,即如下所示的“零件-零件”的置换方式而已。

$$\begin{array}{ccc} \text{零件 } A + \text{零件 } B + \cdots & \longrightarrow & \text{系统} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \text{零件 } A' + \text{零件 } B' + \cdots & \longrightarrow & \text{新系统} \end{array}$$

但是,今后开发的方向还须考虑资源的有限性,考虑用新的单一零件来代替以往用几个零件满足的功能,使其更有效地显示出节省资源、节省能源、可靠性高的特色。这种情况就相当于如下所示的,由一个零件代替几个零件的置换方式。这种方法需要对现象作本质性的理解后,通过从物性到材料的这一个相反途径摸索后才可能实现。

$$\begin{array}{ccc} \text{零件 } A + \text{零件 } B + \cdots & \longrightarrow & \text{系统} \\ \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & \\ \text{新零件 } x + \cdots & \longrightarrow & \text{新系统} \end{array}$$

本书第二个特征是讨论有关材料的设计问题。在1968年岩波出版的工程学基础讲座中向坊教授在工程学基础概论中提出这个问题以来,将近10年了,但是,遗憾的是,在实际创造陶瓷新材料时,至今并没有采用这种方法来取得成效。因此,在本书中想由活跃在第一线的技术工作者在日常的艰苦劳动亲身体验的经验基础上,对这个问题提出挑战,以实际例子来谈陶瓷材料设计的重要性,为今后陶瓷的发展提供一个线索。

如果从使用角度来考虑,则评价材料性能是不可忽视的,这也是本书的第三个特征。象陶瓷工业这样规模较小的工业部

门中,对材料实用性能的评价,不是由工厂自己做的,而不少是委托用户做的,特别在评价包括材料的耐久性在内的实际性能时,更是如此。原因很清楚,这是因为在实际使用中,与材料有关的现象是复杂的,除了在实用试验或者以实用试验为标准的大规模实验室试验中,评价材料的综合性能以外,还没有找到可靠性高的评价方法。然而,这种情况容易造成材料制造厂同用户之间的矛盾。对用户来说,特别会助长他们不从根本上掌握材料的特性,采用与材料相适应的使用方法和设计,积极开发具备所期望功能的新材料,而从用现成的材料凑合使用的倾向。今后我们希望提倡下面的做法,即按开始所讲的,力求彻底应用表征方法,同时深入研究材料将会遇到的现象内容,只以较简单的试验方法得到一些结果为基础,提示能够适应于复杂现象的材料物性及其特性,以后的设计是由用户自己努力解决。

以上,虽谈得极为简单,但却谈到了本书的基本想法及其几个特征,本书对于向用户提供陶瓷材料方面不在于迎合眼前用户的需要,而是希望能有把握地推荐真正有用的材料,不仅如此,而且希望本书将有助于培养在研究和生产中具有独创性地解决问题能力的陶瓷科学工作者和技术人员。

1.2 以陶瓷的力学性质命题的理由

在本书中,采用“陶瓷的力学性质”的标题,把陶瓷制品的力学性质提到第一位,是因为我们每一个单位都致力于开发新制品或把它作为产品出售。在这方面,陶瓷制品的机械强度都是它们的前提条件,常常在此基础上提出其它各种特性的苛刻要求。在这一点上存在着共同的想法。

可是,以这种观点再深入讨论下去,情况却是,最近“材料强

度理论”在陶瓷以外的其它领域有了显著发展,并取得了许多具体的实际成绩(特别在金属方面),与此相比,陶瓷方面应用近代材料强度理论取得的成果较少,换言之,材料强度理论应用于陶瓷还刚开始。而且这理论是在机械工程学中发展起来的,对于陶瓷专业的研究人员、技术人员来说是难懂的,这就不得不使他们产生一种悲观的结论,认为要把此理论照搬过来应用于实际工作中而取得成果是费时的。

另一方面,众所周知,前几年为了使将来陶瓷材料的科学和技术发展,引入了“表征”这个新概念,透彻了解不同的原料和各种制备方法,或产品的显微结构的特征,对创造新物性,新材料来说是不可缺少的。在此趋势下,我们确信,为了弄清陶瓷材料的强度,谋求使之提高,同时使产品质量稳定,作为“表征”的应用,讨论陶瓷材料的强度是适时的。

因此,也根据目前的状况,特别要从未来必须要有独创性出发,我们决定以陶瓷的力学性质命题。

1.3 本书内容概论

陶瓷包括无机材料中的各种物质,所以要在本书中全面谈实用材料强度的各种情况是极其困难的,但是各章节从材料强度角度描述陶瓷特有的性质,可以说这是与所有陶瓷强度问题有关的基本内容。

图 1-2 是一棵“强度树”,它是以陶瓷强度为树干,归纳了陶瓷强度与构成材料的要素和应用范围间的关系。事实上我们费尽心思于怎样围绕强度整理各种因素,把所得的结果与强度联系起来。

我们日常遇到很多与强度有关的问题,例如,哪些因素影

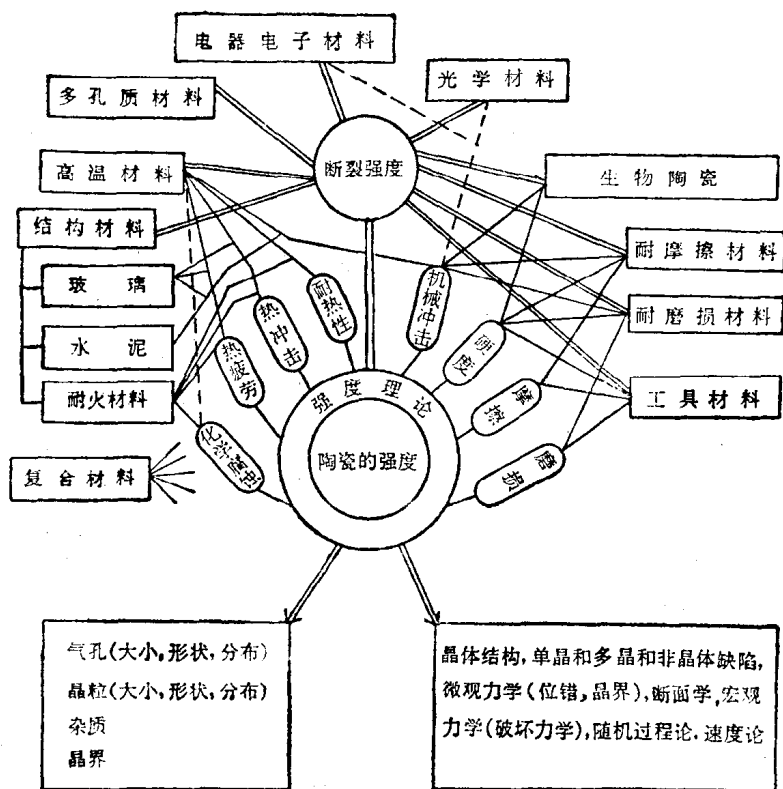


图 1-2 强度树图

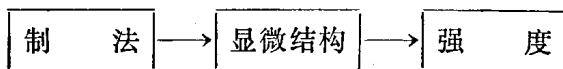
响陶瓷的强度？这些因素与显微结构间的定量关系怎样？强度数据偏差的原因由来？或者陶瓷在怎样状态下发生断裂？断裂的过程怎样？以及所谓陶瓷的韧性指什么等等。若以使用陶瓷的人来说，还有也就是这样一些问题：所谓陶瓷的可靠性是指什么？怎样才能提高陶瓷的可靠性？具有怎样的强度，可能用于怎样的地方？等等。上述这些问题中，既有使用中材料特有的问题，也有整个陶瓷材料共同的问题。因而，图 1-2 所示的“强度树”，是把上述的问题有机地结合在一起，表明现在看到的

各种现象同本质因素的关系。也就是描绘了一幅以陶瓷强度和断裂强度为树干,以它们的理论解释为树皮,把支配强度的宏观因素和微观因素为树根,将各种强度特性以树枝形式伸展到各个应用领域的关系图。

例如,高温材料必须在高温下具有一定的断裂强度,因此,必须掌握如何评价它的耐热性、热冲击、化学腐蚀和机械冲击等几种特性。此外,我们能发现在陶瓷中,用怎样的强度理论来定量确定这几种特性;为了弄清材料特有的因素(如晶体结构),与材料制备工艺有关的因素(如气孔、晶界),断裂力学和随机过程等等同强度理论的关系,设计更好的材料,掌握构成材料的各种原子到该材料所期望的强度特性间的有机联系是何等重要。

因而,在本书评价力学性质的方法(第6章)中能学到整个陶瓷的测定方法,不仅可以学到测定技术,而且掌握材料的制备方法、气氛和试样的形状等对测定数值的重复性和精度的影响,有利于进一步抓住现象的本质。

正如众所周知,有时即使陶瓷组成、测定条件等完全相同,往往由于晶粒大小不同,则强度特性也不同。这可以说是一个陶瓷显微结构与制备方法密切有关的典型例子,可用



的关系表示。反之,首先是用户提出所要求材料的强度特性,用评价强度的方法再从它在怎样的情况下发生断裂来推断理想的显微结构,把支配这种显微结构的各种因素和控制这些因素的制备工艺综合起来进行研究。

本书的一个特征是设置了一些项目作为研究强度与断裂的方法或者在测定力学性质时遇到的各种问题的指南,很好地利用它,对材料特性的定量是极其有效的。

第2章 与陶瓷的力学性质 有关的结构因子

2.1 固体的力学性质

2.1.1 应力和应变

在研究固体的机械性能和力学性质时，应力和应变是衡量力与变形的尺度。首先，简单叙述一下这两个概念。

试想一个负荷作用在一根断面大小相同的直圆棒（图 2-1）上发生拉伸变形的情况。设棒的原始长度为 l_0 ，横断面积为 S_0 ，施加负荷 P 后，棒的长度为 l ，横断面积为 S 。负荷一定时，伸长 $(l-l_0)$ 与 l_0 成正比。在论述材料力学性质时，用随棒的长度而变化的量是不方便的。因此，棒的延伸拟用棒的单位长度的伸长来表示。即 $\left(\frac{l-l_0}{l_0}\right) = e$ ， e 称为应变（正确地称为公称应变）。因此，应变是个无量纲的量。还有，当负荷 P 一定时，伸长与 S_0 成反比。在讨论材料的力学性质时采用伸长也是不方便的。因此，用负荷作用在每单位面积上的力 $\frac{P}{S_0}$ 表示。写成 $\frac{P}{S_0} = \sigma_N$ ，

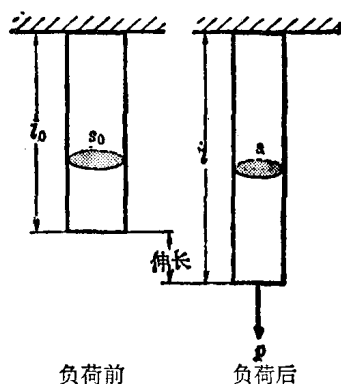


图 2-1 拉伸变形

σ_N 称为应力(正确地称为公称应力)。应力的量纲是 $\frac{\text{力}}{\text{面积}}$ (例如 kg/mm^2)。

变形量小时,可用上述定义来计算应力和应变。但塑性变形等变形量增大后,就不方便了。在图 2-1 中,一般因 S 比 S_0 小,所以施加负荷后的应力 $\frac{P}{S}$ 比公称应力 $\frac{P}{S_0}$ 大。用 σ 表示 $\frac{P}{S}$, 称为真应力。就应变来说,若 $(l-l_0)$ 值与 l_0 相当时,公称应变不能用加法计算。例如,设 $l_0=10\text{ mm}$, $l=12\text{ mm}$, 则公称应变为 $\frac{2}{10}=0.2$ 。另外,试考虑一下,假设从 $l_0=10\text{ mm}$ 。伸长到 $l=11\text{ mm}$, 再从 $l_0=11\text{ mm}$, 伸长到 $l=12\text{ mm}$ 时,则最初的公称应变为 $\frac{1}{10}=0.1$, 接着是 $\frac{1}{11}=0.0909$, 共计为 0.1909 。与直接从 10 mm 伸长到 12 mm 时的值不同。为了避免这类麻烦,用应变对数 ε 表示。应变对数的定义为 $\varepsilon=\ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$ ($\ln$ 为自然对数)。采用应变对数就能用加法运算。变形小时, $\ln\left(\frac{l}{l_0}\right)=\ln\left\{1+\left(\frac{l-l_0}{l_0}\right)\right\}\approx\left(\frac{l-l_0}{l_0}\right)$ = 同公称应变一致。

在图 2-1 中,负荷垂直作用在面上。在这种情况下,通常把

此应力称为正应力, 把其应变称为正应变。与此相反, 如图 2-2 所示的那样, 负荷平行作用在一个面上时, 其应力、应变分别称为剪切应力、剪切应变。

图 2-2 中, 设负荷 P 作用面 $ABCD$ 的面积为 S , 则剪切应力 τ 为 $\frac{P}{S}$ 。另外, 设长方体高为 l , 作用面 $ABCD$ 的移动距离

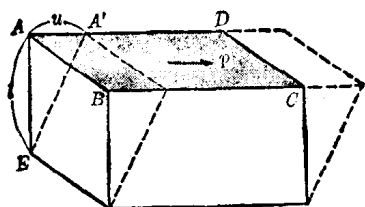


图 2-2 剪切变形

力 τ 为 $\frac{P}{S}$ 。另外, 设长方体高为 l , 作用面 $ABCD$ 的移动距离

为 u ，则剪切应变 γ 为 $\frac{u}{l}$ 。

从上述情况来看，一般任意的力在任意方向上作用于物体上时，物体内部发生形变，如果将其应变分解成与各个方向的分应力相对应的分应变的话，则可分成正应变和剪切应变。同样，也可把应力分解成正应力和剪切应力两个分量。

2.1.2 应力-应变曲线

材料的应力-应变关系，用公称应力 σ_N 和公称应变 ϵ 表示，通常如图 2-3 所示。 OA 为弹性部分， ABC 为塑性部分。 A 称为屈服点， C 为断裂点，与曲线上极大值 B 点对应的应力称为抗拉强度。在 BC 之间，曲线下降，这是由于棒出现缩颈而断面变细使其可承受的负荷降低的缘故。另一方面，用真应力 σ 和应变对数 ϵ 表示应力-应变的关系，其结果如图 2-4 所示。

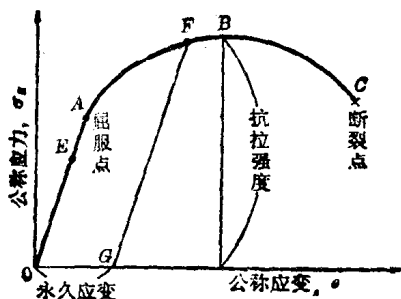


图 2-3 公称应力-公称应变的关系

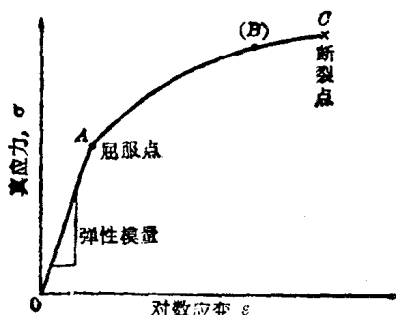


图 2-4 真应力-对数应变的关系

与图 2-3 中出现极大值的部位相对应，在图 2-4 中，曲线是单调上升的。即表示棒上尽管发生缩颈，但在缩颈部分的单位横断面上所承受的负荷（真应力）往往是增加的。把弹性部分直线的斜率称为弹性模量 E ，则 σ ， E ，