

复杂应力状态下的 材料变形与强度

〔苏〕 Г. С. 皮萨林科 著
A. A. 列别捷夫

科学出版社

复杂应力状态下的材料 变形与强度

[苏] Г. С. 皮萨林科 A. A. 列别捷夫 著

江 明 行 译

科 学 出 版 社

1983

内 容 简 介

本书论述了金属材料强度和变形的基本理论及试验方法。

本书内容共两篇。第一篇有六章,包括应力和应变理论,强度理论和假设,强度准则来由和分析,还有科技人员所关心的实验研究课题,例如破坏的微观机理、低周疲劳、统计强度理论、高低温变形和破坏以及许多其他感兴趣的问题。第二篇有五章,叙述了试验设备和方法、高低温实验方法、强度理论验证、极限状态的实验研究。所提出的关于复杂应力状态下材料变形和破坏规律的较大量的实验数据、关于试验设备的设计原理和参数等都是国内外一般文献所缺乏的。

本书可供大专院校工程力学等专业师生、有关工程技术人员、金属材料力学试验人员参考。

Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Издательство «Наука» Москва

1976

复杂应力状态下的材料变形与强度

〔苏〕Г. С. 皮萨林科 А. А. 列别捷夫 著

江 明 行 译

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京朝内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1983年3月第1版 开本: 787×1092 1/32

1983年3月第一次印刷 印张: 13 3/8

印数: 0001—7,020 字数: 305,000

统一书号: 15031·477

本社书号: 2965·15—10

定 价: 2.10 元

译者前言

近年来,随着火箭和空间技术、原子能工程、化工机械等新技术的发展,探求新型结构材料,并合理地设计机械部件,以求有效地利用材料,这是摆在工程师和科学工作者面前的一项十分紧迫的任务。同时,对固态变形体的受力和变形规律,材料强度理论和准则的研究,构成了材料力学的重要内容;它对研究裂纹体的受力和变形,获得其变形场的宏观物理参量,建立弹塑性断裂力学准则,提供了理论依据,材料的强度和变形作为材料的力学性质的一项基础性科研任务,也日益为人们所重视。为配合材料科学科研工作的开展和培养科研干部的需要,现将苏联 Г. С. 皮萨林科(Писаренко)和 А. А. 列别捷夫(Лебедев)所著 Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии 一书的 1976 年原版译出,供有关方面参考。

书中所提到的有关外国学者,除著名的科学家按我国惯用的译名译出外,其余学者的译名均参照有关的外国人译名手册译出。对在书末参考文献中列有相应文献的作者,在第一次出现时在名字上角注出其文献号,这样,其外文全名很容易查得,故译文中不再另注外文原名。在翻译过程中,对原书的一些错误作了适当的注释和处理。

固体材料或构件的受力变形直至破坏的规律,可以从宏观的连续介质力学模型出发,也可以从微观的统计力学模型出发来进行研究。本书分两篇,共十一章。第一篇用六章篇幅以上述两方面的观点详细地阐述了强度理论基础及相应的

准则，各种强度理论的比较分析。第二篇以将近本书的一半篇幅叙述了材料强度试验的各种特制设备及其参数，介绍了试验方法和结果，而这方面的资料正是目前世界各国文献中所缺乏的。本书可供从事金属材料强度方面的科技人员阅读，也可供高等院校工程力学专业等有关的科研和教学工作者参考。

在翻译此书的过程中，得到上海锅炉研究所等单位及有关同志的热忱支持，译稿完成后请清华大学动力系蒋智翔副教授进行了校订，在此一并表示深切的谢意。

本书翻译时间仓促，水平有限，错误之处欢迎读者指正。

1979年6月

目 录

前言	1
----------	---

第一篇 复杂应力状态下变形固体力学和材料强度

第一章 应力与应变理论的基本概念	6
§ 1 变形固体的假设及其力学原理	6
§ 2 一点的应力状态. 应力张量	8
§ 3 一点的变形状态. 应变张量	17
§ 4 八面体的应力和应变	22
§ 5 应力和变形状态的几何解释	27
第二章 复杂应力状态下应力和应变关系	35
§ 1 线性弹性体	35
§ 2 非线性弹性体和非弹性体的应力和应变	41
§ 3 变形时间和速度的影响	48
§ 4 弹性能和塑性变形功	55
第三章 极限状态的力学理论	59
§ 1 塑性变形和破坏	59
§ 2 强度条件和极限面	63
§ 3 由多面体描述的强度理论	65
§ 4 由旋转面描述的强度理论	74
§ 5 联合强度理论	85
§ 6 强度理论的分析	87
第四章 塑性条件与脆性破坏的概括	95
§ 1 决定极限面一般性质的应力状态参量	95
§ 2 偏张量面中极限面的形状	99
§ 3 $\mu_\sigma = \text{常数}$ 平面中极限曲线的形状	103

§ 4	综合强度准则	109
§ 5	综合准则的精确性	123
第五章	不均匀结构材料的强度准则	129
§ 1	破坏机理的现象学模型	129
§ 2	结构非均匀材料强度的双重特性	136
§ 3	统计法计算结构非均匀材料的强度, 极限状态准则	140
§ 4	准则分析及其几何描述	142
§ 5	实验和理论数据的比较	153
第六章	影响材料极限状态的因素	158
§ 1	材料的各向异性, 各向异性体的强度准则	158
§ 2	温度-时间因素, 复杂应力状态的蠕变准则和持久强度	168
§ 3	加载工况, 复杂应力状态的疲劳强度准则	183
§ 4	应力梯度和尺寸因素	201

第二篇 复杂应力状态时材料强度的实验研究

第七章	复杂应力状态时材料的力学试验方法	209
§ 1	高压筒和高压室内的材料试验	209
§ 2	平棱面试件的试验	215
§ 3	圆管试件的材料试验	220
§ 4	平板试件和容器部件的两向拉伸试验	235
§ 5	复杂应力状态时静荷材料试验的其他方法	242
§ 6	材料疲劳试验方法	245
§ 7	变形测量问题	249
第八章	高温和低温条件下复杂应力状态时材料的力学试验	258
§ 1	高温时试验方法的特点	258
§ 2	低温时试验方法的特点	261
§ 3	用于较广温度范围内材料力学试验的 CHT 型装置	269
第九章	复杂应力状态时材料强度实验研究方向和主要成果	279

§ 1	引言	279
§ 2	塑性理论假设的验证	283
§ 3	应力与应变之间理论关系的验证, 承载历史的影响	293
§ 4	材料极限状态条件的研究	299
第十章 低温和高温条件下复杂应力状态时材料的		
	变形规律	307
§ 1	所试验的材料	307
§ 2	实验变形曲线的分析	310
§ 3	材料横向应变系数	320
§ 4	低温时应力与应变偏张量的正比性	329
§ 5	广义变形曲线	334
§ 6	复杂加载时金属低温变形规律	342
第十一章 低温和高温时材料极限状态的研究成果		
§ 1	低温条件下碳钢的塑性准则和极限强度	353
§ 2	低温对复杂应力状态下灰口铁强度的影响	358
§ 3	低温复杂应力状态下铝合金和镍铬钢的流动和破坏	364
§ 4	常温和低温时管试件的破坏特征	371
§ 5	高温时材料的试验结果	373
§ 6	复杂应力状态下材料的持久强度	381
§ 7	低温时应力状态类型对结构材料塑性储备的影响	390
§ 8	低温时材料机械性能的各向异性	395
参考文献		403

前 言

在提高机械的可靠性的前提下,同时降低其重量,已成为当前一项十分迫切的研究任务。解决此任务的实际途径不外乎合理应用新的高强度和超高强度的材料、完善理论计算方法以及考虑到材料实际条件下的性能特点而合理地设计产品构件。

零件基本尺寸通常取决于强度计算,依据强度研究所持的观点,对此概念可以有不同的含意。

强度问题构成固体物理的独立领域,可以用物理观点来研究。近代物理学的发展,由于广泛应用数学工具,同时利用一些复杂的实验成果,就使得直接研究材料变形和破坏的微观原子机理有了可能,并且可根据发展了的一些成熟的概念,对材料的机械性能作出定性的评价。

工程实用中的强度问题牵涉到范围很广的一些科学和技术的课题,并且可归结为必须考虑限制结构承载能力的各种因素。这些因素有:塑性变形而引起的零件形状的显著变化,载荷超过额定值材料的破坏,由于磨损或介质有害作用而引起的零件逐渐损坏,以及材料蠕变或疲劳、稳定性的丧失等因素所招致的零件逐渐破坏。人们通常都把考虑到上述所有因素的结构构件承载能力的确定与强度计算的概念混为一谈。考虑到实际零件的强度常常完全由材料的极限状态来决定,本书中,我们将仅限于“强度计算”这一概念的范畴,并仅在此术语下来理解材料进入流动或达到破坏的应力状态(或变形状态)。

显然,由于机械的和热力的一些复杂而又综合的作用,决定了材料的复杂应力状态(平面应力态或空间应力态),所以大多数零件都受到这种作用的影响。因此就有必要详细研究准则,以便把在简单的载荷(拉伸、压缩、扭转的情况)作用下所得的机械特征量(这些特征量在设计计算时可作为材料的基本资料)同材料的抗塑性变形强度和在任何复杂应力系统条件下的抗断强度相比较。

可以说,根据现有已知的对材料塑性变形和断裂的微观机理进行研究而得出的结果,尚不足以完成工程计算。因此,通常以材料机械性能的平均特征值为依据,来研究固体的变形和断裂规律。

固态变形体力学中,要想解决问题必须同研究强化材料的规律和研究简化模型相应的当量条件联系起来。连续系统力学观点、随机非均匀体力学观点、线性和非线性断裂力学观点为研究的基本观点。很多实用方面的问题都是根据在最大程度上接近于实际运行条件下对特定试样进行试验来解决的。

近来,提出了很多关于等强性准则的假设,这些准则的多数是利用连续介质力学的基本关系式而推导出来的。所以本书第一篇阐述了复杂应力状态材料强度准则的系统性、分析比较和今后的发展,简短地叙述了应力和应变理论的某些问题,着重强调一些特征量,以后利用这些特征量来描述材料的极限状态。

关于确定当量应力的问题(亦即关于强度准则问题)有其一段经历:这方面是由伽利略和莱布尼兹(Leibniz, G. W.)首先提出来的。圣维南(Saint-Venant)、马里奥脱(Mariotte)、拉梅(Lame, G.)、克列柏希(Clebsch, A.)、鲍希格尔(Bauschinger, J.)、柏列脱拉密(Beltrami)、米赛斯(Mises, R.)、

盖基(Генки)和其他杰出的力学家对强度理论的发展作出了很大贡献,后来人们将这些学者的工作所总结成的强度理论,称为经典理论。

过去这方面的理论发展基本上是按照米赛斯-盖基所作的假设的修正,采用各种不同的公式并考虑到球张量的影响,例如 П. П. 巴兰金(Баландин)、И. М. 别利亚耶夫(Беляев)、И. Н. 米罗柳鲍夫(Миролюбов)、М. М. 费洛宁科(Филоненко)-白拉奇契(Бородич)、Ю. И. 亚肯(Ягя)、布琴斯基(Бужинский)、密苏拉(Malsura, M.)、斯达西(Stas)、法林捷泰列(Freudenthal, A)、瑞列赫尔(Schleicher, F.)等人的工作。

С. Д. 沃尔科夫(Волков)根据微观非均匀介质的新模型,用统计方法对库仑-莫尔理论作了总结,弱环(слабое звено)假设为费谢尔(Fisher, T.)和哈洛蒙(Hollamon, T.)强度统计理论的原始根据。在阐明随机非均匀体强度方面,В. В. 鲍洛基(Болотин)提出了一些很有意义的方法,В. В. 潘拿朽克(Панасюк)从线性断裂力学观点出发,对建立复杂应力态脆性强度准则做了一些设想。

在所推荐的一些准则中很难选出哪些准则比较有根据。每一个准则的可靠程度都受到某些材料范围,以及某些主应力比值范围所限制。在科技文献中,还缺乏关于选取材料高低温极限状态准则的某些介绍,关于材料各向异性、加载工况、应力梯度和尺寸因素的影响数据也较少。

本书又讨论了若干新方法,一方面以材料变形和断裂动力学最新概念和已知的实验数据为基础,另一方面,则是根据应力空间中解释为一定强度准则的极限面一般性质和几何形状的现象学分析。这些方法可确定应力态参量,而材料变形时所发生过程的强烈程度又与此参量的水准有关;同时这些方法又可帮助确定极限面的几何形状,而此形状可反映出材

料的一般机械特性；这些方法并可通过对极限面的解析描述定出准则的结构形式。

极不均匀体因存在着各种类型的缺陷，所以其强度统计观点反映在效应函数(функция влияния)准则中，此外，并根据非均匀结构体的随机模型的描述推导出该函数的表达式。

本书的第二篇对某些实验研究工作，即在常温、低温和高温复杂应力状态条件下的某些材料的变形和断裂规律的研究工作，进行了评述和分析。

从制订准则的观点出发来解决强度这一课题的现象学方法得到了蓬勃的发展，并且大大超过了材料机械性能的研究工作。上述这种互相脱节的现象，使得在实践中提出的一系列课题，因缺乏材料的物理机械性能的必要数据，而得不到有足够科学根据的解答。

任何准则的精确度都应通过计算结果与实验数据相比较的方法来判断。关于复杂应力状态下材料变形和断裂规律的成熟实验资料十分有限，这是由于安排试验的方法上有很大困难，在低温和高温条件下进行试验时，这种困难就显得更大。文献中仅发表了一些有关复杂应力状态下材料的低温和高温强度的定性的结果，实际上完全缺乏关于相应试验设备的结构设计原理方面的某些数据。本书第二篇对这些问题给予了特别重视，其中尤其详细地叙述了在作者领导和直接参与下的苏联乌克兰强度研究所所设计和创造的实验装置和方法。在本篇中也对一些主要的实验研究结果进行了分析，以研究在各种不同机械和热加载条件下某些比较有代表性的典型结构材料的强化规律和极限状态准则。

首批发表的内容丰富的实验资料，对低温和高温下使用的部件强度计算和选取最佳结构无疑是重要的辅助资料；这就有可能把有实验根据的修正数据(因温度的影响)引入固态

变形体的变形和断裂的数学模型中，并且使得与材料压力加工和机械-热工强化有关的部分工艺过程的最佳工况更加精确化。

第一篇 复杂应力状态下变形 固体力学和材料强度

第一章 应力与应变理论的基本概念

§ 1 变形固体的假设及其力学原理

变形体力学中，介质可认为是由连续分布的物质所组成的整体。因此，应力、应变和位移可看作是物体各点坐标的连续且可微的函数。假设固体中任意一个小的微粒都具有相同的性质。严格来说，这种对物体性质和结构的解释，与真实情况是有矛盾的，因为自然界中所有真实物体从微观意义上都是各不相同的。结构缺陷（“非均匀性”）是指材料的多结晶聚合、化学成分常态的局部破坏、“非同类”杂质的存在以及导致应力场局部扰动的微观裂缝和其他缺陷。然而，根据统计学的定律，可以认为真实物体各点相对位移与均匀化模型对应点的位移实际上是一致的。缺陷相对尺寸越小，就越有根据认为基于将材料机械性能平均化的连续介质力学的方法是可取的。关于在以弹性理论方法解决力学问题时，用理想介质代替真实介质而引起的可能误差值问题，于1897年已由Ф.С. 亚辛斯基提出并为他所解决^[514]。亚辛斯基当时曾指出，可能的误差值是物体尺寸大小和材料微观体性能的不均匀程度有关。根据他的观点，如若不等式

$$L/\tau \geq a^2$$

成立，就可认为真实介质是理想的（从弹性理论的方程可适用这个意义上来讲）。式中 L ——与所研究物体尺寸同一量级

的某一选作比较的有限长度; τ ——与保持物体物理性质特征的单元尺寸同一量级的长度; α ——由计算要求所选定的足够大的数, 即在所需要的精确度范围内, $1/\alpha$ 值同单位值相比可以忽略不计。较晚的试验结果能确定 τ 的数量级。例如, 可以证明, 具有明显颗粒结构的特种钢所制成的钢丝, 当横截面上存在着大于 30 颗晶粒时, 沿其长度方向具有足够一致的机械性能。另外也作了一些尝试来估计结果误差, 都证实了连续性和均匀性的假设实际上是适用的^[464]。

按照各向同性的假设, 所研究的物体在任何方向具有相同的性质。实际上仅仅非晶形结构的物体才是各向同性的。很多结晶体结构材料, 虽然从宏观上可看作是各向同性的, 然而明显地具有显著的结构性。例如, 锻造钢材和薄钢板的机械性能在不同方向上大不相同。对这些材料应拟定专门的研究方法。

变形体力学中很多内容的重要前提之一是力作用的独立性原理。根据此原理, 弹性体中内力和变形与外力作用的顺序无关, 各单个力引起的效应的总和等价于整个力系的作用效应, 因此认为初始(残余)的应力在物体内部是不存在的。

若假定静力学定理适用于物体每一点以及整个物体, 那末就可以认为外载荷引起的变形与物体尺寸相比是较小的, 所以较高数量级的位移可忽略不计。同时不能忽视, 作用于变形体的外力静力等效系统可导致不同的效果。例如, 如果沿力的作用线移动力或者将它分解为分力, 则物体的应力和应变状态就可能发生变化。

外力的作用并不是使物体中内力增大的必要条件。在某些局部体积内, 平衡的力系也能在实际物体中产生, 例如, 当温度变化时, 由于几何形状复杂的物体(零件)的单元部位受到强制膨胀和压缩; 或由于物体中存在着不同热物理常数的

各种相;或者当相变和其他情况时等等^[109]。

以后还将运用其他一些理想的概念。在研究固体力学个别问题时,所采用的一些假定和假设,将在相应的各章中叙述。

§2 一点的应力状态。应力张量

根据所研究的物体体积内材料均匀性的假设,物体变形

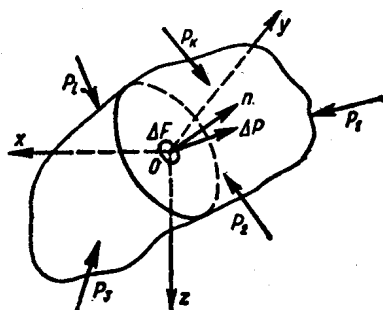


图1 变形体力学中截面法

时材料中所产生的内部约束可以单位面积上产生的内力数值定量地表示。某点内力的强度一般称为应力 σ ,它定义为当面积 ΔF 趋近至一点时比值 $\Delta P/\Delta F$ 的极限值(图1)。

说到一点的应力,必须指出它的方向,一般情况下,此方向同通过该点面积的外法线方向是不重合的。合力 ΔP 的方向可取作应力的方向。

若在点 O 的周围作六个相互垂直的平面,而所得的单元平行六面体的取向应使其各边方向和各坐标轴的方向一致,那么平行六面体的每一个面上将作用着相应的应力。平面 xy , xz 和 yz 上的全应力可以分解至平行于各坐标轴的方向上(图2)。所得的九个应力分量完全决定了该点应力状态,并且构成了一个应力张量,它可用下列形式表示:

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (I.1)$$

法向应力*的下标表示与应力平行方向的坐标轴。剪应力的第一个下标表示此应力的作用面的法线方向，而第二个下标表示与此应力平行的方向。

因此，矩阵(I.1)每一行表示相应的应力向量在各坐标轴上的投影，而每一列表示三个应力向量在相应的坐标轴上的投影。

若法向应力沿着外法线方向作用，则认为此应力是正的。剪应力的符号与坐标轴的选取有关，若在某平面上的法向应力的正方向与此应力作用方向平行的坐标轴

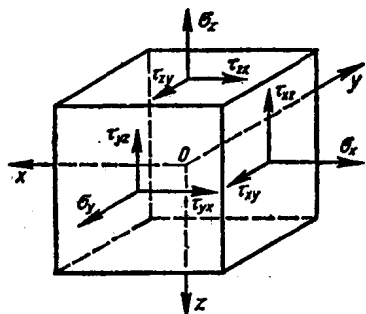


图2 单位六面体各边面的应力

方向相重合，则该平面上相应的坐标轴方向取作为剪应力的正方向。图2中，剪应力方向同相应的坐标轴方向相反。但是，法向应力方向同坐标轴方向相反，故剪应力仍为正的。

可以证明，具有由相同字母组成下标的剪应力是相等的：

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}.$$

由此得到剪应力互等(或者成对)定理，它是柯西首先提出和证明的：在变形物体每一点上，作用在两互相垂直平面内，且垂直于此两平面交线的剪应力分量，数值上互等，也就是在与应力张量主对角线对称位置上的各张量分量相等(对角线通过 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)。

因而，要完全确定所研究点的应力状态无须知道九个，而只须知道六个分量数值即可： $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$ 。

* 法向应力即通常所谓的正应力。在以后的各章节中有时也称正应力。

——译者注