

高等学校教材

材料力学实验

(第二版)

天津大学 合编
北京航空学院

贾有权 主编

高等教育出版社

本书是在第一版基础上修订增补而成。第二版保留和加强了基本实验和选择性实验,并增加了参考性实验一章。

全书共分五章。第一章绪论;第二章试验机 and 变形仪;第三章包括十一个基本实验;第四章有九个选择性实验;第五章编入了十一个参考性实验,其中有四个断裂方面的实验和七个光测力学应力分析实验。

本书包含了教学大纲规定的全部实验,可作为高等工业学校机械、土建、水利、航空、造船等专业多学时材料力学的实验教材,也可作为材料力学实验单独设课时的教学用书,还可作为从事材料强度研究的工程技术人员参考用书。

高等学校教材
材料力学实验

(第二版)

天 津 大 学 合 编
北京航空学院
贾 有 权 主 编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.5 字数 227,000

1984年4月第2版 1984年10月第1次印刷

印数 00,001—20,280

书号 15010·0587 定价 1.45 元

第二版序言

本书第一版于1964年根据当时教育部审订的材料力学多学时教学大纲和各校当时的教学设备情况编写而成。现已相隔近二十年,在此期间实验技术得到了发展,新技术、新设备不断出现,材料力学教学内容也有所更新,有的学校开设高等材料力学之类的选修课,还有的学校拟进行单独开设实验课的试点。根据这一情况有必要对此书进行修改和补充,以适应当前教学的需要。

第二版除保留和加强了基本实验和选择性实验外,重点增加了材料的断裂韧性试验、电测实验和近代光测力学实验。对每个实验都扼要地介绍了实验原理、测试技术和方法。全书共计有三十一个实验,其中基本实验十一个,选择实验九个,参考实验十一个。如单独设课,每周一次,一学期可选作二十几个实验。

本书可作为材料力学多学时类型如机械、土建、水利、航空、造船等专业实验课的教材,或单独开设材料力学实验课的教材。还可用作从事材料强度研究的工程技术人员参考书。

参加本书第二版编写人员有天津大学贾有权、肖为、区连民(§1~§20, §25~§30, §35~38, §44~50, 附录I), 北京航空学院高镇同、朱国粹、刘文琰(§21~§24, §31~34, §39~§43, 附录II, 附录III)。全书由贾有权主编,高镇同、苏翼林参加了定稿工作。

本书承杨宗发、云大真两同志进行了认真的审阅,提出了很多宝贵意见。此外在编写过程中得到上海交通大学梁美训、北京航空学院王中、天津大学计欣华、杨乃震、任志宏、邵立国等同志的帮助,对此一并表示感谢。本书虽经修订,仍难免有欠缺和错误之处,希读者予以指正。

编 者

1984.3.

原 序

编写本教材时,我们考虑到各校设备不同,实验安排各异,如果综合齐全,则篇幅将会过大,若写得太少,又难以满足各校需要。因而感到,要编写出能完全符合各校特点的通用实验教材,有很大困难。但为了提高教学质量,我们根据1962年审订的教学大纲(试行草案)的要求,并参考了十几个兄弟院校的材料力学实验讲义,作了一次大胆尝试。本书内容力求反映各校的共同要求,以期能在教学中试用。

今对本教材的编写原则和使用时应注意事项说明于下。

1. 在内容方面以1962年审订的机械、土建类150学时材料力学教学大纲(试行草案)为依据,本着“少而精”的原则,删减了一些次要内容,加强了基本实验部分。

2. 基本实验是本书的骨干,以期符合加强基本功的精神。并参照国家有关的部颁标准,对实验具体要求和操作规程,作了明确规定;还强调了试验前的准备工作和试验后的报告书写,以保证实验教学质量。

3. 本书各节内容均有一定的独立性,各校可根据具体情况和专业的不同要求,加以选用。如试验机和变形仪一章,为适应各校选用,将一般常用型号的设备都作了介绍,但这些材料不必要求学生全部阅读。为了使各章节能单独阅读,文中不免有一定的重复。

4. 为了加强实验方法的指导,在绪论中概述了实验方法的一般原则。并在每个实验项目的实验步骤中,结合具体内容加以阐述。学习时可互相参照阅读。

5. 在各实验项目中,对实验原理、实验步骤等均有详细叙述,

但有关试件材料、尺寸、加载大小和所使用的设备等，未作统一规定，必要时，可另发补充讲义。有些实验也可用小型仪器来完成。

6. 关于实验报告，本书只给以少量的示范性的格式。在实验课上还须发给报告用纸。

7. 本书包括有选择性实验一章，对于某些实验时数较多或有特殊要求的专业，可以选作。

在编写过程中，承许多兄弟院校教研室的同志们和程本蕃、杜庆华、孙训方、方孝淑、阮孟光等同志提供许多宝贵意见，并经胡沛泉、陆才善两同志详细审阅，天津大学、北京航空学院的领导也给予大力支持，特此致谢。但由于编者水平有限，书中欠妥之处，在所难免，希读者予以批评指正。

编 者

目 录

第二版序言	4
原序	1
第一章 绪论	1
§ 1 概述	1
§ 2 内容简介	4
§ 3 实验时注意事项	5
第二章 试验机和变形仪	9
§ 4 试验机的一般介绍	9
§ 5 油压摆式万能试验机	10
§ 6 杠杆摆式万能试验机	14
§ 7 拉力试验机	18
§ 8 扭转试验机	21
§ 9 高频率疲劳试验机	27
§ 10 电子万能试验机	31
§ 11 引伸仪的一般介绍	36
§ 12 杠杆式引伸仪	37
§ 13 表式引伸仪	42
§ 14 镜式引伸仪	45
§ 15 电阻应变仪	49
§ 16 应变计式引伸仪	62
§ 17 差动变压器式引伸仪	65
§ 18 $x-y$ 函数记录仪	66
§ 19 光线示波器简介	69
第三章 基本实验	72
§ 20 试验机操作练习	72
§ 21 拉伸试验	74
§ 22 拉伸时金属材料弹性常数的测定	83

§ 23	压缩试验	91
§ 24	圆轴扭转试验	96
§ 25	剪切试验	102
§ 26	电测静应力实验(一)电阻应变仪操作练习	104
§ 27	梁的弯曲实验	107
§ 28	电测静应力实验(二)空心圆轴主应力的测定	113
§ 29	电测静应力实验(三)工字梁主应力的测定	117
§ 30	电测静应力实验(四)组合变形时内力素的测定	120
第四章	选择性实验	126
§ 31	条件比例极限的测定	126
§ 32	条件屈服应力 $\sigma_{0.2}$ 的测定	130
§ 33	真应力应变曲线的测定	134
§ 34	压杆稳定实验	137
§ 35	冲击试验	141
§ 36	硬度试验	145
§ 37	振动实验	150
§ 38	脆性涂层实验(示范性)	153
§ 39	疲劳试验	155
第五章	参考性实验	163
§ 40	平面应变断裂韧度 K_{Ic} 的测定	163
§ 41	延性断裂韧度 J_{Ic} 的测定	182
§ 42	临界裂纹张开位移 δ_c 的测定	193
§ 43	疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的测定	198
§ 44	光弹性的演示实验	210
§ 45	光弹性法测定应力集中系数	221
§ 46	光弹性贴片法实验	225
§ 47	全息光弹性法测定主应力和	231
§ 48	全息法测定挠度	237
§ 49	散斑干涉法测定面内位移	242
§ 50	云纹法测定位移	247
	附录	257

附录 I 应变分析	257
附录 II 数据处理和误差分析	263
附录 III 量纲分析和相似理论	283
附录 IV 单位换算表	292

第一章 绪 论

§ 1 概 述

实验是进行科学研究的重要方法，科学史上许多重大发明是依靠科学实验而得到的，许多新理论的建立也要靠实验来验证。例如材料力学中应力应变的线性关系就是虎克于 1668 年到 1678 年间作了一系列的弹簧实验之后建立起来的。不仅如此，实验对材料力学有其更重要的一面，因为材料力学的理论是建立在将真实材料理想化、实际构件典型化、公式推导假设化基础之上的，它的结论是否正确以及能否在工程中应用，都只有通过实验验证才能断定。在解决工程设计中的强度、刚度等问题时，首先要知道材料的力学性能和表达力学性能的材料常数。这些常数只有靠材料试验才能测定。有时实际工程中构件的几何形状和载荷都十分复杂，构件中的应力单纯靠计算难以得到正确的数据，在这种情况下必须借助于实验应力分析的手段才能解决。

测定材料的力学性质的材料试验是一门历史悠久的学科。过去高等工科学学校均单独开设“材料试验”课程。实验应力分析则是一门新兴的学科。材料力学实验是根据教学上的需要和近代材料力学的发展引入以上两门学科的基本内容，再加上材料力学课程本身的需要从 1954 年以后才形成的，它是具有我国特点的材料力学实验教学环节。通过这一教学环节使学生学到测定材料性质的实验的基本知识、基本技能和基本方法，了解实验应力分析的基本概念和初步掌握验证材料力学理论的方法。这对培养学生的动手能力和科学习惯都是十分重要的，并且对培养学生在四化建设中

的实际工作能力也是有其重要意义的。

近代工业要求设计人员合理地设计各种结构和零件,使之达到强度高、刚度好和重量轻的目的。这就促使材料科学、结构分析、材料力学的各种新分支飞速地发展起来,相应的材料力学实验也在不断地采用新技术以适应新的要求。因此本书适当地介绍了一些新设备、新技术和新方法,为今后学习打下良好基础。

实验是科技工作者必须掌握的重要手段。重视实验,并不是说科学研究可以不重视理论研究,而只是说,科学研究不能以书本为基础,而只能是以实验为基础。正如笛卡儿所说:“决不可过分地相信自己单单从例证和传统说法中所学到的东西”。谁想致力于科学研究并取得成就,谁就必须学会动手,亲自作实验。材料力学的理论基础是实验。第一个用实验来研究结构材料强度的是达·芬奇。他作过各种不同长度铁丝的强度试验,同时也作过梁的弯曲试验。又如伽里略在十七世纪三十年代用实验方法研究了拉伸、压缩及弯曲现象。以后有人进一步用实验证实了伯努利的梁弯曲平面假设理论的正确性。十九世纪末,材料力学进入了飞速发展的阶段,1883年到1887年间在欧洲一些国家开始建立材料力学实验室,1898年美国成立材料试验学会。1920年间开始进行高温下蠕变试验,与此同时也开始了疲劳试验研究。二十世纪以后随着生产的发展,材料力学实验所用的试验机和测量仪器也在不断地革新和发展。近十几年来由于宇航、原子能工业以及其他现代工业的发展,新材料、新技术不断出现,如激光技术和计算机技术的出现促使材料力学实验也不断地产生新方法以适应生产的需要,同时也为新的力学分支,如断裂力学、复合材料力学等提供新的实验手段。例如高温下复合材料的疲劳试验,复合材料的断裂试验、低周疲劳试验以及各种非金属材料试验等,就要求有更为复杂的试验机和仪表,例如用伺服机构和微型计算机控制的实验机,

各种精密光学仪器以及自动记录仪等。过去我国根本没有光学应力测试元件和材料实验机制造业,但近二十多年来我国已能自制各种类型的试验机、变形仪和其他光学精密仪表以及自控试验机等。我国的材料力学实验技术正在蓬勃的发展着,并且在各行各业中为四个现代化做出了贡献。

材料力学的现代成就也包括用实验方法进行应力分析。1920年以后根据物理光学中的双折射现象建立起来的光弹性法,可以解决材料力学理论与弹性力学理论无法求解的一些生产上较为复杂的难题,但它只限于使用有光学效应的模型。1943年以后根据电阻丝变形导致电阻改变的原理,生产了电阻应变仪及电子测量仪器。尺寸很小的应变片可以贴在机器内部测取机器运转时的真实应力,这就给实验应力分析打开了一个新的境界,生产上对这一方法有极大的兴趣。近二十年来由于激光技术、全息干涉技术、近代光学和声学技术的发展,又产生了许多新的实验手段,例如全息法、云纹法、散斑计量干涉等方法。这些新的实验手段正在被我国各高等学校和研究机构所采用。

已如前述,从试验中得到的材料的力学参数是工程设计的根本依据。为了使实验结果具有通用性,必须将试件尺寸和试验方法作统一的规定,实行试验标准化。最早在1889年在巴黎召开了应用力学国际会议,会上讨论了材料试验,而且一致承认必须用几何相似的试件来作实验,决定建立国际材料试验组织,统一标准,并且需要经常修改旧的标准,增补新的标准。我国也有相应的试验标准化规定。

材料试验标准化是一项十分重要的工作,我国在国务院下设有国家标准局统管这项工作,不仅包括材料试验标准化,还包括其它方面的标准化。标准化水平是衡量一个国家生产技术水平和管理水平的尺度,是现代化的一个重要标志。随着科学技术、经济的

发展和国际贸易的扩大,采用国际标准已成为世界性的发展趋势。此外对所用的试验机和仪器,都规定了它们的最大许可误差,超过误差范围的试验是无效的。因此当我们学习材料力学试验时不仅要有材料力学理论基础知识,且通过实验帮助我们深化理论,更重要的是要了解材料力学试验的特殊性,即试验技术、机器仪器的操作、现代技术在材料力学实验中的应用以及实验方法等,以培养动手能力,严肃认真的精神和良好的科学习惯。

§ 2 内 容 简 介

材料力学实验包括以下三方面内容:

(一) 验证理论性的实验

材料力学中的一些公式都是在简化和假设的基础上(平面假设,材料均匀性、弹性和各向同性假设)推导的。事实上材料的性质往往跟完全均匀和完全弹性是有差异的,因此必须通过实验对根据假设推导的公式加以验证,才能确定公式的使用范围。此外对于一些近似解答,其精确度也必须通过实验校核后才能在工程设计中使用。在本书中介绍的梁弯曲实验、工字梁实验、压杆稳定等实验均属于这类实验。

(二) 材料的机械(力学)性质试验

材料力学公式只能算出在外载荷作用下构件内应力的 大小。为了建立强度条件必须了解材料的强度、刚度、韧性、硬度等特性,这就需要通过拉伸、压缩、扭转、冲击、疲劳等试验来测定材料的强度极限、弹性模量、疲劳极限等力学参数。这些参数是设计构件的基本依据。这些试验要依据国家规范,按照标准化的程序来完成。通过这类试验,可以巩固所学的材料机械性质的知识,初步掌握测试方法。

(三) 应力分析实验

工程上很多实际构件的受力情况,无法用材料力学公式进行计算,近年来虽然可以用有限元法计算,但也要经过适当简化才有可能;对用有限元法计算的结果的精确性,也要通过实验应力分析加以验证。此外零件设计中的应力集中系数的确定,机器和建筑结构使用时的应力实测等,均需靠实验应力分析的方法。本书中的电测法、光弹性法、全息法、云纹法、散斑法均属于这类实验。本书对其中最基本的电测法和光弹性法将作较详细的讲述,至于其它实验方法则只作简要的介绍。

§ 3 实验时注意事项

在常温、静载荷条件下,材料力学实验所涉及的物理量并不多,主要的是测量作用在试件上的载荷和试件的变形。载荷一般要求较大,由几吨到几十吨,故加力设备较大;而变形则很小,绝对变形可以小到千分之一毫米,相对变形(应变)可小到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$,因而变形测量设备必须精密。在进行实验时,力与变形要同时测量,因此非一人所能完成,一般需要三、四人。这就要求很好地互相配合,要有岗位责任制,否则,就不能有效地完成实验。根据以上特点,实验时应注意以下几个方面。

(一) 操作前的准备工作

首先要明确实验的目的、原理和步骤,然后选定试件(或模型)。要了解试件是用什么材料制造的,原材料有无缺陷,加工是否合格(有些试件的尺寸公差、表面光洁度要符合一定要求)。这些都要严格检查,然后细心地测量试件的尺寸。估算应加载荷,并拟出加载方案。此外,需设计记录表格,以备实验时记录数据之用。

实验小组的成员,应分工明确,操作要相互协调,才能得到较好的实验效果。要有统一指挥,以免配合不当,导致整个实验失败。譬如,力和变形的测量,要同时进行,如操作不一致,则测出来

的变形就不能代表在相应载荷作用下的变形。反之,测出的力也不能代表在相应变形下的力。实验时要有默契或口令,以便互相呼应,彼此协调。参加实验的人员一般可作如下分工:

1. 记录者一人 在整个实验中,记录者应当是总指挥,因为他掌握实验数据与全部资料,可以看出数据的好坏,以及实验是否完整。

2. 测变形者一人 担任这项工作的人,应深入了解仪表的性能,要预习一遍仪表的操作规程,特别要弄清仪表的单位和放大倍数,以免读错。实验时应负保护仪表的责任,如发现仪表失常,应立即停车检查。

3. 试验机操作者及测力者一人 他在实验前须着重阅读机器操作规程,实验时要严格遵照规程进行操作。事先要试车,要注意安全。发现实验机异常时应立即停车。

对所使用的机器和仪器要进行适当选择(在教学实验中,实验用的机器和仪器往往是指定的,但对怎样进行选择应当有所了解)。

选择试验机的根据是:(1)需要什么样的载荷(如使试件拉伸、弯曲或扭转);(2)需要多大的载荷,前者由实验目的来决定,后者则主要依据试件(或模型)尺寸和材料来决定。

变形仪应根据实验精度和应力梯度等因素来选择。如应力均匀,则可采用大标距(即测点间距离大)的变形仪;如应力梯度大(如应力集中附近),则选用小标距的变形仪。此外,使用是否方便,变形仪安装有无困难,也都是选用时应当考虑的问题。

以上这些准备工作做得愈充分,则实验会进行得愈顺利,故准备工作十分重要。

(二) 进行实验

在正式开始实验以前,要检查试验机测力度盘指针是否对准

零点, 变形仪是否安装稳妥, 试件装置是否正确等。最后还应请指导教师检查, 俟教师检查无误后方可开动机器。第一次加载, 可不作记录(不允许重复加载的试验除外), 观察各部变化是否正常, 如果正常, 再正式加载并开始记录。此时, 记录者及操作者均须严肃认真、一丝不苟地进行工作。实验完毕, 要检查数据是否齐全, 并注意清理设备, 把借用的仪器归还原处。

(三) 实验报告的书写

实验报告是实验者最后交出的成果, 是实验资料的总结。报告应当包括下列内容:

1. 实验名称, 实验日期, 当时的温度, 实验者及组员姓名。
2. 实验目的及装置, 应画出装置简图。
3. 注明使用的机器和仪表的名称、型号和精度(或放大倍数)等。其他用具也要写清。

4. 实验数据处理。在记录纸上绘制的表格内填入测量数据。填表时, 要注明测量单位, 例如 cm 或 mm 等等。此外, 还要注意仪器本身的精度和有效数字。在正常状况下, 仪器所给出的最小读数, 应当在允许误差范围之内。换言之, 仪器的最小刻度应当代表仪器的精度。例如, 百分表最小刻度是 0.01mm, 其精度即为百分之一毫米。但实际测量时可估计到最小刻度的十分位, 例如 0.128 mm 或 128×10^{-3} mm, 其中最后一位数字 8 就是估计出来的, 所以说该数为三位有效数字。所有表格均应整洁清楚, 便于看出全部测量结果的变化情况、它们的单位和精确度。

在多次测量同一物理量时, 每次所得数据并不完全相同, 这是因为事实上仪器的精度有限, 再加试验时客观因素复杂, 不可避免地会产生误差。由统计理论可知, 多次测量同一物理量时, 所得各次数据的算术平均值为最优值, 亦即最接近真值的值^①。故在材料

^① 参阅附录 II 数据处理和误差分析。

力学实验中, 当对同一物理量作多次测量时均取测量结果的算术平均值作为该物理量的最佳值。

5. 计算。在材料力学实验中, 用小型计算机或计算器即可, 但须注意有效数字的运算法则, 免得计算或记录过多的位数, 浪费时间。例如, 截面面积 $A = 2.34 \text{ cm} \times 5.21 \text{ cm}$ 的计算结果, 不必写成 $A = 12.1914 \text{ cm}^2$, 而写作 $A = 12.2 \text{ cm}^2$ 即可。在一般材料力学实验中, 可选三位有效数字。

在计算中, 所用到的公式, 均须明确列出, 并注明公式中各种符号所代表的意义。

6. 结果的表示。在实验中除对测得的数据进行整理并计算实验结果外, 一般还要采用图表或曲线来表达实验的结果。曲线均应绘在方格纸上。图中应注明坐标轴所代表的物理量和比例尺。实验的坐标点应当用记号表出, 例如: “ $\times$ ”、“ $\triangle$ ”、“ $\circ$ ”、“ $\cdot$ ”等等。当连接曲线时, 不要用直线逐点连接成折线, 应当根据多数点的所在位置, 描绘出光滑的曲线或用最小二乘法或协调法进行计算, 选出最佳曲线。

7. 在报告最后部分应当对实验结果进行分析, 说明本实验的优缺点, 主要结果是否正确, 并对误差加以分析, 还要回答教师指定的思考问题。

总之, 整个实验过程可以分为三大部分:

第一部分 操作前的准备工作。试验机及仪表的准备工作, 复习操作规程。在正式开始实验以前, 一定要经过教师检查。

第二部分 实验操作并测取数据。在正式实验前, 最好先试加载荷, 观察其现象。一切正常后, 再开始测取数据。

第三部分 书写报告。报告中应当数据完整, 曲线、图表齐全, 计算无误, 并有讨论和分析。

第二章 试验机和变形仪

§ 4 试验机的一般介绍

在材料力学实验中,一般都要给试件(或模型)施加载荷,这种加载用的设备称为材料试验机。试验机根据所加载荷的性质可分为静荷试验机和动荷试验机;根据工作条件又可分为常温、高温和低温等试验机;按所加载荷的形式分类则有拉力、压力和扭转等试验机。如果同一台机器能兼作拉伸、压缩和弯曲等多种试验,则称为万能试验机。试验机所能施加的载荷有大有小,小的1~2 kg,大的可达几千吨。一般材料力学实验室常用的有常温、静载5t~60t的万能试验机,拉力和扭转等试验机。

试验机的种类很多,一般都是由下列两个基本部分组成。

(一) 加载部分

它是对试件施加载荷的装置,除油泵外,主要安装在图5-1的右边部分。一般所谓加载,都是利用一定的动力和传动装置强迫试件发生变形,使试件受到力的作用。

(二) 测力部分

它是传递和指示试件所受载荷大小的装置,主要安装在图5-1的左边部分。试验机一般还有一种称为自动绘图器的装置,它可以在实验过程中,自动地画出试件所受载荷与变形之间的关系曲线。

为了保证实验可靠,试验机要满足一定的技术条件,其标准由国家统一规定。其中重要的规定之一,是要求试验机载荷的示值