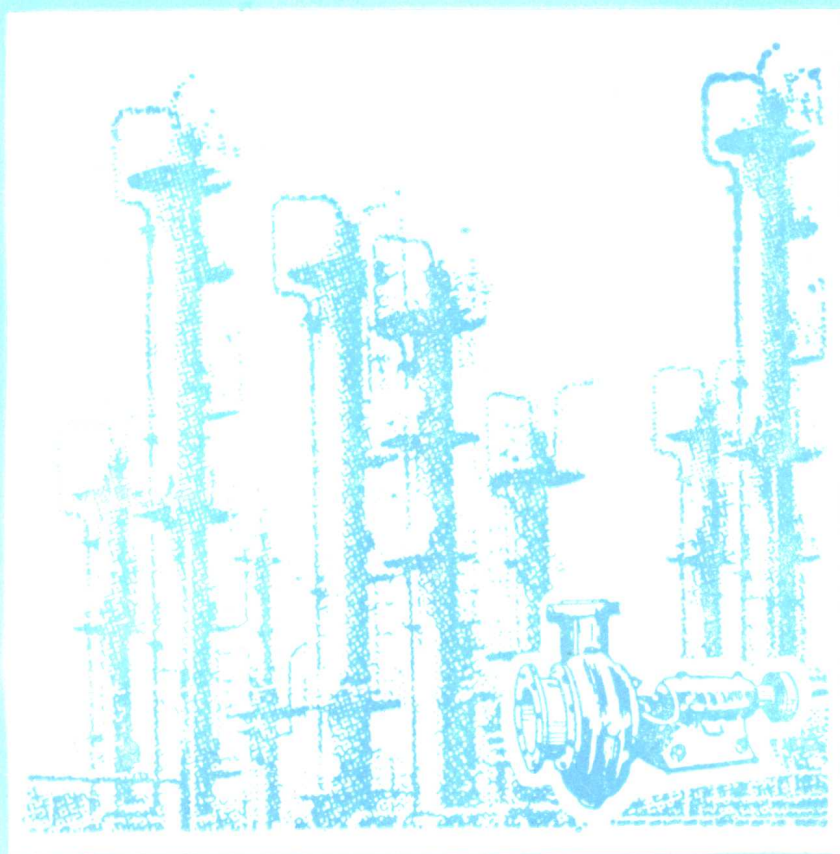




高等学校教材

化工机械专业实验

贾高顺 主编 孙启才 审定



化学工业出版社

Q05
86

TQ05
36

高等学校教材

化工机械专业实验

贾高顺 主编 孙启才 审定

化学工业出版社

(京)新登字039号

内 容 提 要

本书是依据全国高等学校化工设备与机械专业教学指导委员会对专业教学的基本要求并根据化工部(87)化教高字第124号文件决定编写的。全书共六章,主要论述压力容器应力测量、容器整体试验、无损检测试验、泵与压缩机性能测试、振动试验、化机结构对过程影响等实验的原理、装置、方法与测试结果的分析。为贯彻教学指导委员会关于专业实验的基本要求,在附录中提供了八项基本实验的要点及微机应用的程序。本书作为高等学校化工设备与机械专业的教材,也可供从事化工与通用机械的设计研究、产品开发、设备管理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工机械专业实验 / 贾高顺主编. — 北京: 化学工业出版社, 1989.11 (1998.4重印)
高等学校教材
ISBN 7-5025-0575-X

I. 化… II. 贾 III. ①化工机械-实验-高等学校-教材 ②化工设备-实验-高等学校-教材 IV. TQ05-3

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第05540号

高等学校教材

化工机械专业实验

贾高顺 主编

孙启才 审定

责任编辑: 孙世斌

封面设计: 郑小红

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市朝阳区东华印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本787×1092毫米1/16 印张9³/₄ 字数226千字

1989年11月第1版 1998年4月北京第3次印刷

印数: 14001—17000

ISBN 7-5025-0575-X/G·161

定 价: 11.50元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

前 言

本书是按照全国高等学校化工设备与机械专业教学指导委员会1986年11月在上海召开的实验工作会议、1987年4月在成都召开的教材工作会议的精神，及化工部（87）化教高字第124号文件的决定而编写的，为化工机械专业实验课程的教材。

化工设备与机械的专业实验种类繁多，本书仅论述应用较广并具有代表性的专业实验。编写时，既注意到当前国内的实验条件，又适当反映现代科学技术的发展，力求做到专业理论与测试技术的结合，理论联系实际。

本书共分六章，内容如下：

第一章、压力容器应力测量 压力容器应力应变测量的特点、工程测量实例与微机技术的应用。

第二章、压力容器整体试验 耐压试验、爆破试验、疲劳试验与外压失稳试验。

第三章、无损检测试验 X-射线、超声波、磁粉与渗透探伤的要点、缺陷评定方法及应用实例。

第四章、泵与压缩机性能测试 离心泵性能曲线、汽蚀余量的测试及微机应用；活塞式压缩机排气量、轴功率、示功图的测定；制冷压缩机制冷量的测定。

第五章、振动试验 临界转速的影响因素与测定方法，机器基础振动与隔振试验。

第六章、化机结构对过程的影响 结构与过程的辩证关系、试验方法，空气换热器、卧式螺旋离心机结构对性能影响的试验与分析。

鉴于专业实验的基本要求，在附录中还介绍了八项基本实验的要点及微机应用的程序，供有关院校参考。

本教材应在化工原理、化机测试技术、算法语言等课程先修的基础上与化工容器及设备、化工机器课程配合进行教学。各校在使用本书时，可视具体情况适当地删减。

本书由浙江工学院贾高顺 教授主编，兼编绪论、第四章第一、三、四节、第五章、第六章；王伟编写第一章、第三章、第四章第二节及附录B；章成志编写第二章、附录A、C。主审为成都科技大学孙启才教授。

由于编写时间比较仓促，限于编者水平，欠妥与谬误之处在所难免，敬望兄弟院校及读者指正。在编写过程中一直受到专业教学指导委员会及实验课程组成员的关怀与指导，在此深表谢意。

编者 1987年12月

目 录

绪论	1
第一章 压力容器应力测量	3
第一节 压力容器应力应变测量的特点	3
一、压力容器电阻应变法测量应力的基本原理及方法	3
二、电阻应变法测量时应注意的问题	5
第二节 压力容器应力测量工程实例	10
一、YSP-15型民用液化石油气钢瓶应力测量	11
二、热压成型弯头的高温应力测量	12
三、圆柱形压力容器开孔接管三维有限元计算的电测实验验证	16
第三节 微机技术在应变测量中的应用	18
一、基本概念	19
二、测量系统及各部分的作用	21
三、系统控制及说明	22
第二章 压力容器的整体试验	24
第一节 容器的耐压试验	24
一、液压试验	24
二、气压试验	27
三、耐压试验结果的评定	27
四、超载水压试验	27
五、气密性试验	28
第二节 残余变形测定	29
一、直径变形测量	29
二、电阻应变测量	30
三、容积变形测量	30
四、容积残余变形率合格标准的讨论	34
五、容积弹性变形的允许值	36
第三节 压力容器爆破试验	37
一、爆破试验曲线	37
二、理论计算公式	38
三、爆破试验装置与试验程序	39
四、爆破断口分析	40
五、爆破试验结果评定	41
第四节 压力容器疲劳试验	42
一、疲劳试验装置及工作原理	42

二、疲劳试验系统一般操作要点	44
三、压力容器疲劳测试方法举例	45
四、疲劳试验中人工裂纹预制及裂纹扩展留痕方法	47
第五节 外压容器失稳试验	48
一、外压容器失稳现象与临界压力	48
二、受横向均布外压的筒体	50
三、轴向承受压缩载荷的筒体	50
四、横向和轴向同时均匀受压的筒体	50
五、外压容器试验	50
第三章 无损检测试验	52
第一节 无损检测概要	52
一、X射线检测	52
二、超声波检测	55
三、磁粉及渗透探伤	59
第二节 无损探伤实例	60
一、一吨液氯钢瓶焊缝的X射线探伤与评定	60
二、板材的超声波探伤	61
第四章 泵与压缩机性能测试	63
第一节 离心泵性能试验	63
一、离心泵的性能参数	63
二、试验类别与试验系统	64
三、性能曲线	66
四、临界汽蚀余量的确定	69
五、性能测试中的精度要求	70
第二节 微机技术用于泵性能测试	71
一、测量控制系统及各部分的作用	71
二、系统的标定与控制	72
第三节 活塞式压缩机性能测试	72
一、基本性能指标与验收规则	72
二、排气量测定	73
三、轴功率测定	79
四、示功图的录取与分析	81
第四节 制冷压缩机制冷量测定	87
一、制冷量的概念	87
二、测定制冷量的方法	88
三、第二制冷剂量热器法的装置与计算	89
第五章 振动试验	91
第一节 临界转速与影响因素	91
一、临界转速的概念	91

二、影响临界转速的因素	93
第二节 临界转速的测试	95
一、测试装置	95
二、测试方法	96
第三节 机器基础振动与隔振试验	101
一、简化的振动模型	102
二、影响基础振动的因素	103
三、基础振动试验	103
第六章 化机结构对过程的影响	106
第一节 机械结构与过程的辩证关系	106
第二节 结构对过程影响的试验方法	106
一、古典试验方法	107
二、模型试验法	107
三、数学模拟法	108
第三节 空气换热器结构对性能的影响	109
一、空气换热器的用途与构造	109
二、空气换热器性能与结构的关系	113
三、试验与分析	114
第四节 卧螺离心机结构对性能的影响	115
一、结构型式对性能的影响	115
二、结构与操作参数对性能的影响	117
三、试验	118
附录	120
A、八项基本实验要点	120
实验一 内压薄壁容器应力测定实验	120
实验二 压力容器爆破实验	121
实验三 外压容器失稳实验	122
实验四 无损探伤实验—超声波探伤	123
实验五 压缩机性能测定实验	125
实验六 临界转速实验	127
实验七 离心泵性能测定实验	128
实验八 结构对过程影响实验—卧螺离心机结构参数对分离性能的影响	129
B、参考程序及方法	131
B、1 边缘应力求解方法及程序	131
B、2 制表打印程序	141
B、3 实验数据的绘图及曲线打印方法	142
C、工程常用单位与国际单位(SI)关系换算表	143
主要参考文献	144
高等学校化工设备与机械专业本科《化工机械专业实验》课程教学基本要求	146

绪 论

一、课程的目的与任务

随着科学技术的发展,现代测试技术在化工设备与机械中的应用日益广泛,化工机械工程技术人员在产品开发研究及设备管理工作中,有否较强的测试与故障诊断能力显得相当重要。全国高等学校化工设备与机械专业教学指导委员会正是考虑到这一情况,分析了多年来专业实验附属于专业课的利弊,提出了单独开设化工机械专业实验课程的意见。化机专业实验单独设课,首先可以引起师生对专业实验的重视,化机专业实验不单纯是个实验,而是一门课程,是有理论、有实际、两者紧密结合的课程;其次可以在学时与实验条件方面得到较好的保证,不再是可有可无、可多可少的辅助环节;第三可以加强学生动手能力的训练,扩大专业实验的作用,避免单纯验证理论的毛病,从而有可能达到预期的效果。

本课程的任务有三:1.较为系统、深入地了解现代测试技术在化工机械中的应用,把化机专业理论与测试技术结合起来,掌握主要技术参数的测试原理、装置与试验方法;2.利用实验手段深入认识化机结构与性能的关系,增强在实践中获取知识、解决实际问题的能力;3.了解化机科研的基本方法,加强学生智能开发,培养初步的科研能力。

二、课程的内容与安排

化工设备与机械种类繁多,需要试验、测定的内容相当丰富。在众多的内容中,本课程按照设课的目的与任务,选取化机专业实验中应用较多并具有代表性的内容,如下所述。

1. 压力容器应力测量、整体试验与探伤技术

压力容器是化学反应器、换热器、塔设备、贮罐等设备的受压壳体,在化工厂中使用最普遍。其安全可靠直接关系到工厂的正常生产与安全运行。对压力容器进行强度检测、缺陷评定与一系列安全性试验,是化工机械工程技术人员的重要任务。本课程利用化工容器及设备的基本理论、国家的有关规范结合化机测试技术:(1)着重论述,压力容器应变测量中应注意的温度影响、长导线影响、多点测量、高温测量、高压液下测量等特殊问题,并结合应用实例介绍这些问题的处理方法;(2)系统地阐述压力容器的耐压试验、爆破试验、疲劳试验及失稳试验,较为详细地说明这些试验的装置、过程与试验结果;(3)扼要地介绍X-射线、超声波、磁粉与渗透探伤的原理、装置、缺陷评定方法与工程应用实例。

2. 泵与压缩机性能测试

泵与压缩机也是化工厂应用很广的机械。其性能的好坏关系到化工生产过程的连续与稳定,也关系到化工生产技术经济指标(产量、能耗等)的高低。无论是制造厂还是使用厂对于泵、压缩机技术参数的测试与故障分析都是十分重视的。从教学方面来考虑,泵、压缩机性能的测试牵涉到许多常用物理量(流量、压力、温度、转速、功率等)的测试方法,而掌握这些方法,无疑对于其它化工机械性能的测试有举一反三的作用。因此,本课程参照国家有关标准,着重讨论:(1)离心泵性能曲线与汽蚀余量的测定;(2)活塞式压缩机排

气量、轴功率与示功图的测定；(3)制冷压缩机制冷量的测定。

3. 振动试验

化工机械中旋转与往复机械甚多，振动问题也很突出，如何减小振动、降低噪声、保证机器正常运转，是化工机械工程技术人员十分关注的问题。为了减小振动，使工作转速避开临界转速是旋转机械正常工作的基本原则；为了减小机器振动及其对周围厂房、设备的影响，选择合适的基础是很为重要的。因此，本课程从实验的角度着重介绍：(1)高速旋转机械临界转速的影响因素及测定临界转速的方法；(2)影响机器基础振动的因素及基础振动的试验方法。

4. 化机结构对过程影响试验

化工机器及设备的结构是由在其中进行的物理或化学过程的需要确定的，而结构型式与参数的不同又将影响过程的效果。结构与过程的关系是相互依存又相互促进的辩证关系。化工机械工程技术人员要设计、开发新的结构，或者要改造一些旧的结构，深入了解结构对过程影响的规律性，掌握结构对过程影响的试验研究方法是十分必要的。因此，本课程着重介绍：(1)结构与过程的辩证关系；(2)结构对过程影响的试验方法；(3)以空气换热器与卧螺离心机作为化工设备与机器的实例，探讨结构对过程的影响。

本课程的安排基本上以上述的测试内容为线索，从静止的压力容器到运转的化工机器，最后介绍并讨论化机结构对过程影响的试验研究方法。在内容安排上注意了以下两个问题：

1. 考虑到本书是化工机械专业实验课程的教材，不是实验指导书。因此，教材正文中着重论述实验原理与方法，有一定的深度与广度，至于具体的实验要求则在附录中提供八项基本实验的要点；在阐述实验原理与方法时，注意理论联系实际，同时尽量避免与专业理论及化机测试技术重复。

2. 在教材内容中不仅注意到国内大多数院校的试验条件，也适当反映现代测试技术的发展。因此，在压力容器与泵性能测试中应用了微机技术，并提供了微机处理程序；在压缩机示功图的测试中介绍了电子式示功图的测试；在临界转速测定中介绍了频响函数分析法；在结构对过程影响试验中简要介绍了数学模拟法。

三、学习方法

本课程是一门理论联系实际、实践性很强的课程。学习时应以实践为主、课堂讲授为辅。为了达到较好的学习效果，在开设本课程前应先修“化工原理、算法语言及化机测试技术”等课程；在本课程教学时，应与“化工容器及设备”、“化工机器”课程密切配合；在进行实验时应强调自学、自己动手，应根据实验的目的，自己考虑实验所必需的装置、实验的方法步骤、实验应测定的数据和实验结果的分析，从而有利于培养学生独立进行实验的能力，有利于完成本课程的三项任务。

第一章 压力容器应力测量

第一节 压力容器应力应变测量的特点

压力容器的种类很多,按类型主要可分为厚壁容器和薄壁容器。按照工艺要求设计制造的压力容器,其筒壁或封头上安装或焊有各种接管、支座、人孔、吊环等等。这些零部件的存在,使得某些部位的应力分布变得相当复杂。为了确保结构的安全运行,就必须对这些部位进行必要的应力分析。除了一些很简单的结构可以进行理论分析之外,目前用于对压力容器进行应力分析的主要手段有:实验应力分析方法及有限元计算方法。虽然用有限元方法对压力容器进行数值分析确是一种行之有效的工程手段,但是,由于其需要较专门的知识,且对不少结构或零部件,由于形状或受力比较复杂,较难用有限元进行模拟。在这些情况下,采用实验应力分析方法将是合理的选择。此外,在一些重要的结构中,如该反应容器,在进行数值分析的同时,还需要进行模型或实际结构的应力测量,以验证数值分析的可靠性和计算精度。由此可见,在压力容器的应力分析与强度设计中,实验应力分析占有重要的地位。

实验应力分析的方法比较多,但目前应用广泛的有两种,即光弹性方法和电阻应变法。其中又以电阻应变法应用得最为广泛。它不仅可用于模型的应力测量,还可用于实际结构的应力测量;不仅可用于常温,而且可用于高温及低温下的应力测量;另外,该法还用于动态应力及高压液下的应力测量。

电阻应变法还有精度高、数据处理简单等特点,但只能测量结构或模型表面的应力,而且由于电阻应变片有一定的栅长,只能测量栅长范围内的平均应变。

本节只介绍电阻应变法在压力容器应力测量中的应用。

一、压力容器电阻应变法测量应力的基本原理及方法

电阻应变法是用电阻应变片测定零部件或结构指定部位的表面应变,再根据应力应变关系式,确定构件表面应力状态的一种实验应力分析方法。其基本原理是:将电阻应变片(简称应变片)固定在被测构件上,当构件变形时,应变片的电阻值发生相应的变化。通过电阻应变仪,可以将应变片中的阻值变化测量出来并以正比于应变值的模拟电信号输出,最后就可以用记录仪记录。电阻应变法测量可以用关系式表示为

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{dR}{R} \quad (1-1)$$

式中 ε ——应变仪测得的应变值;

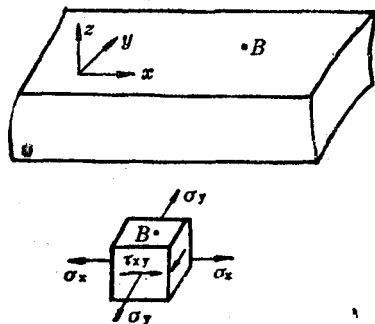


图 1-1 测点的应力状态

dR/R ——应变片阻值随构件变形而发生的相对变化；

k ——比例系数，常称之为应变片的灵敏系数。

若被测部位在弹性范围内工作，对测得的应变值，可以采用虎克定律来换算得到对应的应力值。一般来说，压力容器应力测量用的应变片是贴在没有外力作用的构件表面上（高压液下测量例外），在这种表面上的点，如图1-1中B点，处于双向应力状态，其应力应变关系为

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) \\ \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \gamma_{xy} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中 E ——材料的弹性模数；

μ ——泊松比；

σ ——正应力；

τ ——剪应力；

ε ——正应变；

γ ——剪应变；

x 、 y 、 xy ——下标表示应力或应变的方向。

如果测量时主方向可以断定，则可令式1-2中

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1, \quad \sigma_x = \sigma_1$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_2, \quad \sigma_y = \sigma_2$$

$$\gamma_{xy} = 0$$

得到

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \end{cases} \quad (1-3)$$

由此可得，一个双向应力状态，当主方向已知时，只要用两个工作片，沿两个主方向粘贴，测得两向主应变 ε_1 、 ε_2 后，就能算出双向主应力。

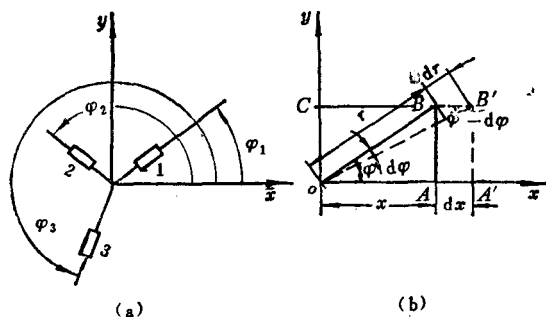


图 1-2 主方向未知时的贴片及平面应变分析

对于压力容器，有些部位的应力主方向是未知的。从式1-2可知，必须有三个独立的数据才能确定该点的应力状态。由于应变片测得的是栅长方向的正应变，因此，无法直接利用式1-2进行计算。

要解决这一问题就必须借助于平面应变分析^{〔2〕}。对图1-2(a)所示任意粘贴方向的应变值 ε_{φ_i} ($i=1, 2, 3$) 与 ε_x 、 ε_y 、

γ_{xy} 的关系为

$$\varepsilon_{\varphi i} = \varepsilon_x \cos^2 \varphi_i + \varepsilon_y \sin^2 \varphi_i + \gamma_{xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (1-4)$$

式1-4可以由 ε_x 、 ε_y 和 γ_{xy} 在 φ_i 方向引起的正应变 $\varepsilon'_{\varphi i}$ 、 $\varepsilon''_{\varphi i}$ 、 $\varepsilon_{\varphi i}''$ 迭加而得到。

以图1-2(b)为例,由 ε_x 引起的 φ_i 方向的应变 $\varepsilon'_{\varphi i}$ 可由下列分析得到

$$\varepsilon_x = \frac{dx}{x}, \quad \varepsilon'_{\varphi i} = \frac{dr}{r}$$

$$r = \frac{x}{\cos \varphi_i}$$

$$dr = dx \cdot \cos(\varphi_i - d\varphi_i)$$

因为 $d\varphi_i \rightarrow 0$, 故有

$$\cos d\varphi_i = 1, \quad \sin d\varphi_i = 0$$

$$dr = \cos \varphi_i \cdot dx$$

由上述各式得

$$\varepsilon'_{\varphi i} = \frac{dr}{r} = \frac{\cos \varphi_i \cdot dx}{x / \cos \varphi_i} = \frac{dx}{x} \cdot \cos^2 \varphi_i = \varepsilon_x \cos^2 \varphi_i$$

同理可由几何分析得到由 ε_y 及 γ_{xy} 引起的 $\varepsilon_{\varphi i}''$ 、 $\varepsilon_{\varphi i}'''$ 分别为

$$\varepsilon_{\varphi i}'' = \varepsilon_y \sin^2 \varphi_i$$

$$\varepsilon_{\varphi i}''' = \gamma_{xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i$$

将 $\varepsilon'_{\varphi i}$ 、 $\varepsilon_{\varphi i}''$ 、 $\varepsilon_{\varphi i}'''$ 相加即得到式1-4。

由于 $\varepsilon_{\varphi 1}$ 、 $\varepsilon_{\varphi 2}$ 、 $\varepsilon_{\varphi 3}$ 可以用三片应变片分别测出, 对式1-4代表的三条方程联解, 就可从 $\varepsilon_{\varphi 1}$ 、 $\varepsilon_{\varphi 2}$ 、 $\varepsilon_{\varphi 3}$ 得到 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} , 再由式1-2计算得到 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 。两向主应力及 σ_1 与 x 轴正向的夹角 θ , 可用莫尔圆或下式得到

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \\ \operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \end{cases} \quad (1-5)$$

实用上, 为了简化计算及测量的准确性, 三个应变片与 x 轴的夹角 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 总是取特殊角, 例如 0° 、 45° 和 90° , 或 0° 、 60° 和 120° , 并且将三个应变片制在同一基底上(常称之为应变花)。三片夹角为 45° 的应变花适用于主方向大致知道的情况。将互相垂直的两片沿估计的主方向粘贴, 这样贴片方位不准造成的误差对结果影响较小, 可以得到较正确的测量结果。三片夹角为 60° 的应变花主要用于主方向无法估计的情况。

在用电阻应变法测量应力时还应该选择合适的应变仪、应变片, 并用适当的工艺进行应变片的粘贴。有关这方面的知识, 应参阅有关书籍。

二、电阻应变法测量时应注意的问题

压力容器用电阻应变法进行应力分析除与一般材料力学实验应力分析具有某些相似之外, 还有一些明显的特点。一是所需测量的点通常很多; 其次是往往需要反复多次加、卸载; 最后, 进行实际结构的应力分析时, 需要在现场进行。因此, 就必须有效地处理温度

漂移、长导线修正及多点测量的问题。

(一) 温度影响及消除方法

温度变化时,应变片的本身电阻值会发生变化。另外,温度变化也会造成结构材料的膨胀或收缩。当应变片阻丝材料的线胀系数与构件材料不同时,阻丝就会受到附加的变形,从而造成电阻值的变化。这些由温度变化而引起的虚假变形,当然也造成应变仪的输出。严重时,每 1°C 温升,应变仪的指示应变可达几十微应变。

在常温压力容器应力测量中,消除温度影响的方法是采用所谓的“温度补偿片”。对于图1-3所示的桥式电路,其输出电压的变化与各电阻变化之间的关系为

$$d u_{BD} = \frac{u}{4} \left(\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right) \quad (1-6)$$

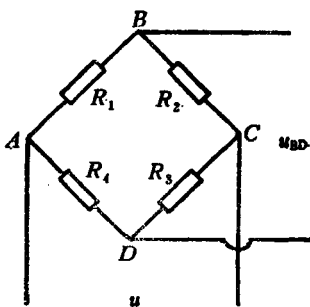


图 1-3 桥式电路

压力容器应力分析时往往采用半桥测量法。

此时, R_3 、 R_4 不参与测量, 且 $R_3 = R_4$ (阻丝材料也相同, 一般此两电阻直接安装在应变仪内), 温度变化引起的影响自然相互抵消。工作片 R_1 用于测量结构真实应变且同时感受温度变化引起的虚应变。取 R_2 为温度补偿片, 将其粘贴在一块与被测构件材料相同但不受力的试块上, 并将此试块与被测构件捆在一起, 使它们处于同一温度环境中, 因此, R_2 也感受温度变化引起的虚假应变。从式 1-6 可知, 当工作片和补偿片的阻值、灵

敏系数及电阻温度系数相同时, 温度影响将被排除。

除应变片温度变化造成的虚假应变应该排除之外, 工作片与补偿片的测量导线温度变化引起的虚假应变也应排除。按照相同的补偿原理, 只要两组导线的型号、规格、长度相同, 且将它门并排在一起走相同的路径, 保证两组导线所处的温度场相同, 就能使温度变化引起的影响得到补偿。

(二) 长导线的影响及修正

当被测构件远离应变仪时, 应变片与应变仪之间的连接导线会对测量结果带来误差。通常, 这种影响系由导线电阻和导线之间的分布电容所致。

导线电阻的影响表现为使应变仪显示的应变读数比真实应变小, 相当于减小了应变片的灵敏系数。一般导线长度在 10m 以上时应考虑对导线电阻进行修正。

设阻值为 R 的应变片感受应变后阻值变化了 dR , 应变片的灵敏系数为 K 。当无导线电阻影响时, 应变仪测得的真实应变由式 1-1 表示。当导线电阻为 R_L , 应变仪仍调整在灵敏系数 K 进行测量, 则应变仪测得的读数将为

$$e' = \frac{1}{K} \frac{dR}{R + R_L} \quad (1-7)$$

真实应变 e 与应变仪测得的读数 e' 之比为

$$\frac{e}{e'} = 1 + \frac{R_L}{R}$$

因此,当考虑导线电阻影响时,如仍用应变片的真实灵敏系数 K 进行测量,则测得的应变读数 ε' 应进行修正

$$\varepsilon = \varepsilon' \left(1 + \frac{R_L}{R} \right) \quad (1-8)$$

当然,也可以将应变仪的灵敏系数调整到修正后的灵敏系数 k' 进行测量

$$k' = k \frac{R}{R + R_L} \quad (1-9)$$

采用图 1-4 所示公共地线接桥法,可以减轻导线电阻对测量的影响近一半。工作片和补偿片各用一根长导线与应变仪相连,而片之间先选用一短导线相接,再用公共地线与应变仪相接。此时,在每一桥臂中只有一根导线电阻的影响,而公共地线的电阻并不串接在桥臂之内。

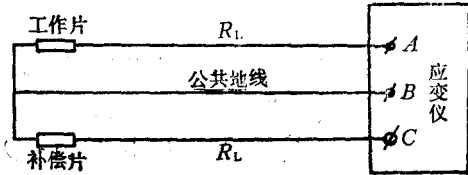


图 1-4 公共地线接桥法

由于图 1-3 所示的测量电桥一般采用交流供电,导线分布电容就相当于在工作片与补偿片上各并上一个电容,它对测量的影响主要是降低应变仪的灵敏度。进一步的分析结果表明,如果工作片与补偿片的分布电容近似相等,由分布电容引起的误差就可以忽略不计。当导线长度超过 30m 时,应采用下列方法使分布电容近似相等:

1. 单片测量时,将工作片和补偿片分别用两根规格和长度均相同的二芯屏蔽线接入电桥。

2. 对所有工作片共用一个补偿片的情况,可以将所有工作片的一根引线及补偿片的一根引线焊在一起组成中线接入电桥 B 端,工作片及补偿片的另一根引线分别与规格和长度均相同的普通导线相连,并将全部测量导线结扎成束。对若干组工作片采用若干片补偿片的情况,也采用类似的方法分组对待即可。

(三) 多点测量应注意的问题

在压力容器应力测量中,经常遇到大量测点的情况。为了有效地利用仪器设备,多点测量往往是通过预调平衡箱来完成。对常用的半桥单片补偿的情况,平衡箱切换开关的接触电阻串入桥臂电阻。当接触不稳定时,将带来虚应变及零点漂移。另外,工作片轮流接入桥路,而补偿片却长期通电,由此引起温升不同,温度补偿效果较差。因此,当测点转换后,应等待一段时间,待检流计指针稳定后再读数。对于导热性较差的构件,应增加补偿片的数目,使得转换工作片的同时亦转换补偿片,从而使补偿片亦有机会轮换以利散热。

采用预调平衡箱进行多点测量时,另一个需注意的问题是每组应变片的阻值相差不能超过一定的数值。原因是预调平衡箱的预调范围是有一定限度的。例如 P20R-1 型预调平衡箱,预调范围为 $\pm 2000 \mu\Omega$,与之对应的阻值变化范围为

$$dR = K\varepsilon R$$

取 $K=2$ 、 $R=120\Omega$, 则

$$dR = \pm 2 \times 2000 \times 10^{-6} \times 120 = \pm 0.48\Omega$$

考虑到切换开关及接线头的接触电阻变化,一般取每组电阻值相差在 $\pm 0.2\Omega$ 以内。

(四) 高温条件下的测量

很多大型压力容器,如合成塔、锅炉及核容器,常常处于高温条件下运行。对这些高温状态下的结构进行应力测量,遇到的主要问题是高温应变片的性能及温度补偿方法。常温应变片一般只适用于 $-30^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$,在更高的温度下,常温片的材料及性能都不适用。现有生产的高温应变片的工作温度大约在 650°C 以下。对各种不同的温度条件,应选用不同的高温应变片。具体可参阅有关应变片的使用说明书。高温应变片的另一个使用上的特殊之处是大都需要专用的点(滚)焊机将应变片焊在测量构件上,并且采用专门的导线进行连接。

在选定了高温应变片之后,测量中需要解决的问题是温度补偿。由于高温测量时温度变化可能很大,因此,除了可以采用温度补偿片方法进行一定的补偿之外,还有其它一些问题需要解决。

首先,高温应变片在温度条件下,即使不受任何应力,也会产生随温度变化的电阻变化。在应变仪上就表现为应变形式,称之为热输出 ε_T 。对于某些特定材料制成的高温应变片,由温度变化引起的热输出平均小于 $0.1\sim 1\mu\text{e}/^{\circ}\text{C}$,称之为高温自补偿应变片。但是,一般到摄氏几百度时,总热输出也有几百微应变。因此,高温应变片总是必须事先测定其在被测构件上的热输出曲线及各应变片之间的热输出分散度。通常设定应变仪的灵敏系数 $k_{\text{仪}}=2.00$ 进行测量。具体的测试方法可参阅文献^[3]。典型的热输出曲线如图1-5所示。一般希望

热输出尽量小,但一定大小的热输出是可以修正的,而热输出的分散度一般无法排除,对测量准确度影响最大。

对于稳态高温下的热应力测量,可以类似于常温测量采用温度补偿片进行温度补偿。但不同之处在于应对每个温度稳态,在零压力下进行应变仪调零。这种方法可以有效地改善热输出及热输出分散性对测量结果的影响。对无温度补偿的高温应变测量,应从测量应变值 $\varepsilon_{\text{仪}}$ 中减去对应温度下的热输出所带来的影响

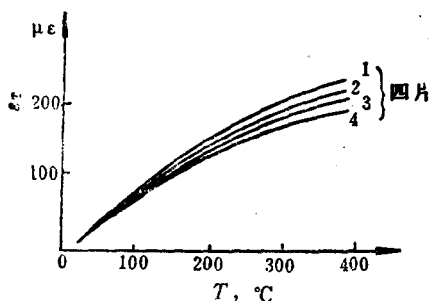


图 1-5 典型的热输出曲线

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\text{仪}} - \varepsilon_T \quad (1-10)$$

应该注意的是:测量应在应变仪灵敏系数 $k_{\text{仪}}$ 与测量热输出曲线时所设定的灵敏系数相一致的条件下进行。否则应进行适当的修正后才能用式1-10进行热输出修正。另外,在使用式1-10进行修正之前,需用式1-8对 $\varepsilon_{\text{仪}}$ 进行导线电阻修正。当然,如 ε_T 中未包含导线电阻的影响,则也应进行相应的修正。

用式1-10得到的 ε' 并非构件的真实应变。原因是高温应变片的灵敏系数是随温度而变化的。典型的灵敏系数——温度曲线(常称为 $k_T-T^{\circ}\text{C}$ 曲线)如图1-6所示。一般此曲线由高温应变片生产厂随货提供。由于实际测量时应变仪灵敏系数总是调在与测量热输出曲线时的仪器灵敏系数 $k_{\text{仪}}$ 相同(如 $k_{\text{仪}}=2.00$),因此,对经式1-10进行热输出修正后的应变值 ε' 需按对应点的温度用下式计算该点的真实应变值 ε 。

$$\varepsilon = \frac{k_{\text{仪}}\varepsilon'}{k_T} \quad (1-11)$$

高温应变测量中应该注意的问题还有接线方法及应变片的防护等。由于导线电阻也随温度的变化而变化,为了消除此影响,常采用三线法(对采用温度补偿片的情况除外)。如图1-7所示,三线法是在应变片引线处接三根导线,导线的材料、直径和长度都相同,并在一起走相同的路径引至应变仪。由于工作桥臂和补偿桥臂有相同的一份导线电阻受温度影响产生的电阻变化,这样就消除了导线电阻随温度变化引起的测量误差。

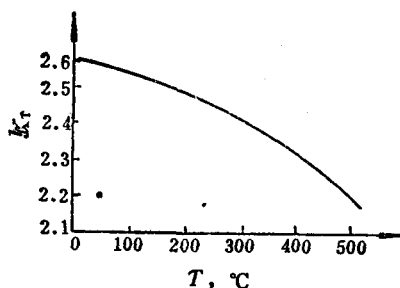


图 1-6 典型的高温应变片 K_T-T °C 曲线

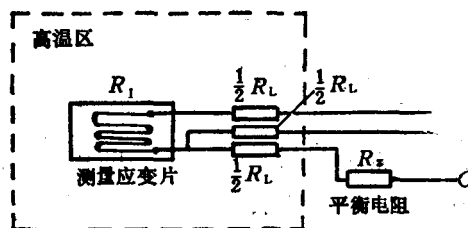


图 1-7 三线法原理图

高温应变片的防护问题,在大多数的情况下,由于高温应变片不接触水或蒸汽,故不需要特殊的防护措施。如需要,大多采用不锈钢罩和不锈钢管,用滚焊机将防护罩边缘焊在被测结构的表面。这种防护措施的成败与否,主要取决于滚焊焊缝的质量。因此,必须严格控制和检查。

最后顺便指出,在高温应变测量中,往往还需同时测量各测点的温度,以消除温度分布不均匀的影响。

(五) 高压液下的应变测量

电阻应变法似乎是目前唯一可用的测量充液压力容器内壁应变的方法。高压液下应变测量时,由于应变片和导线与液体介质接触并受液压作用,因此,除按一般技术要求外,还要解决以下三个特殊问题:

1. 应变片和引线在液体介质中的防护;
2. 应变片引线从容器内部引出时的密封;
3. 应变片在液压下引起的附加应变(称压力效应)的消除。

为了保证应变片与被测构件之间有足够的绝缘电阻,并防止液体介质渗入而使粘结剂失去传递变形的能力,必须对处于液态介质中的应变片加以防护。工程实际中使用的工作介质种类繁多,对不同的介质,应变片的防护方法亦不尽相同。鉴定防护是否合适的主要指标是:在测量期间的绝缘电阻、应变读数的线性、重复性等。

对于试验用压力容器或实验室条件下,通常以变压器油作为工作介质。这种油绝缘性好,腐蚀性小,常无需对应变片作特殊防护。为在油浸入前防潮,有时在应变片上涂上一层凡士林或环氧树脂。

在现场测试中,大多数情况是以水为工作介质。水是一种非绝缘介质和良好的溶剂。它与应变片接触后,将使绝缘电阻大大下降并使粘结剂抗剪强度降低,不能正确地传递变形,严重时,还会使应变片与构件脱开。众多的防护方法可以用于高压水下应变片的防护^[3]。图1-8给出了一种综合防潮措施^[4],可成功用于压力约30MPa的容器试验。

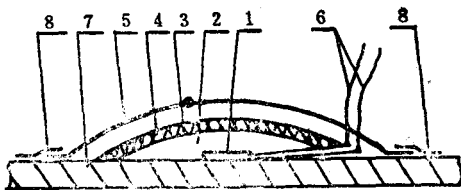


图 1-8 综合防潮措施

1—应变片；2—凡士林；3—环氧树脂纱布；4—机油；
5—橡皮；6—引出导线；7—筒体；8—固化环氧树脂

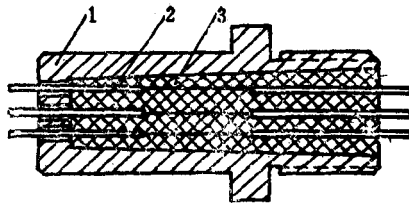


图 1-9 环氧树脂密封装置

1—密封外壳 2—引线 3—环
氧树脂

应变片的引线密封装置也已有成功的经验^[3]。图 1-9 所示为环氧树脂引线密封装置。其密封压力可达 400MPa 以上。该结构承压能力与密封外壳的有效长度成正比，与内径成反比，并与环氧树脂和密封外壳间的抗剪强度有关。环氧密封剂用 6101* 环氧树脂、环氧氯丙烷、邻苯二甲酸二丁脂及乙二胺按 100:8~10:8~10:7 的重量比例配制。将中间剥下一段的塑料导线穿过定位孔后注入密封剂，待固化后即可使用。

高压液下应变片由于压力引起的附加应变，即压力效应，与许多因素有关。例如介质压力大小、应变片的构造和形状、粘结剂厚度和性能、防水涂层及容器的曲率等。一般用实验加以确定。典型的实验表明，采用软性防护层或不用防护层时，单位压力作用下的压力效应产生的附加应变为 $-0.6 \sim 0.12 \mu\epsilon/\text{MPa}$ 。因此，压力较低时可不予考虑。当然，为了测试结果的精确性，有时采用内补偿法对压力效应产生的附加应变进行修正。

内补偿法就是将粘有温度补偿片的试块置于容器中，由于补偿片与工作片成半桥连接，承受相同的压力及温度，因此，压力效应及温度影响可以同时得到较好的补偿。应该注意，由于此时补偿块受三向均匀压力作用，将产生应变而影响测量结果。由理论计算可得到三向均匀压力下试块的应变为

$$\epsilon_s = -\frac{1-2\mu}{E} p \quad (1-12)$$

式中 ϵ_s ——补偿试块的附加应变；

μ ——补偿试块的泊松比；

E ——补偿试块的弹性模量；

p ——补偿试块承受的液压。

将 ϵ_s 值从测量结果中减去即得到真实应变。应该指出：这里所指的真实应变为内壁三向应力状态 ($\sigma_3 = -p$) 时的应变值。如欲与式 1-3 计算值进行比较，则还应从测量结果中减去 $\mu p/E$ 。原因是式 1-3 是从平面应力状态得到的。

现场测试中还应注意的是：由于加压会引起一定的温升及大容器加载所需的时间较长，气温也会发生一定的变化。因此，还要尽量缩短工作的时间。采用卸载次序进行测量，可以有效地减少测量间隔的时间，从而避免温度发生变化。

第二节 压力容器应力测量工程实例

这一节中，给出了三个压力容器应力测量工程实例。它们包括：常温条件下的民用液化石油气钢瓶应力测量；高温条件下的热压成形弯头应力测量；高压液下的压力容器接管内