

GUOCHENG ZHUANGBEI
YU KONGZHI GONGCHENG ZHUANYE
SHIYAN JIAOCHENG

过程装备 与 控制工程专业 实验教程

戴凌汉 金广林 钱才富 ● 编著



化学工业出版社

过程装备与控制工程 专业实验教程

戴凌汉 金广林 钱才富 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书可作为过程装备与控制工程及相关专业大学本科生和相关专业高职生的专业实验教材。专业实验是学生将理论知识与实践融会贯通的桥梁,因此本书在编排上先简单介绍了与实验相关的理论知识,然后再介绍各具体专业实验项目,以利于学生对专业知识的全面掌握。

本书第1篇简单介绍了过程装备与控制工程专业主干课程中与专业实验相关的一些基本知识,包括过程装备中压力容器强度实验和探伤知识;流体机械中的泵和往复式压缩机的基本知识;过程装备控制、检测与诊断技术的基本知识。

本书第2篇是过程装备与控制工程专业实验指导,涵盖了本专业涉及的21个实验项目。其中过程设备实验项目9个、过程流体机械实验项目5个、过程装备控制实验项目7个。对每个实验项目均介绍了该实验的实验目的、实验内容、实验装置、实验原理、实验步骤和实验报告要求,并有思考题供学生思考。

本书最后介绍了具有北京化工大学自主知识产权的过程设备与控制多功能综合实验台和过程装备与控制工程专业基本实验综合装置。

图书在版编目(CIP)数据

过程装备与控制工程专业实验教程/戴凌汉,金广林,钱才富编著. —北京:化学工业出版社,2012.8
ISBN 978-7-122-14992-3

I. ①过… II. ①戴…②金…③钱… III. ①化工过程-化工设备-实验-高等学校-教材②化工过程-过程控制-实验-高等学校-教材 IV. ①TQ051-33②TQ02-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第173222号

责任编辑:叶晶磊 唐旭华
责任校对:边涛

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装:三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张10 字数244千字 2012年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:26.00元

版权所有 违者必究

前 言

化工设备与机械专业是工科类高等学校的一个传统专业，曾培养出了许多优秀的专业技术人才，为国家的经济建设，特别是石油化学工业的建设和发展做出了突出贡献。随着改革开放的深入，工业结构的调整，新知识、新技术不断涌现，需要对传统的化工设备与机械专业进行改革，为此，从 1999 年起，全国化工设备与机械专业改为过程装备与控制工程专业，并增设了有关控制方面的课程，其目的是面向 21 世纪培养知识面广、创新能力强、综合素质高的大学生。为达到这一目的，专业实验的内容也必须进行相应改革。

以机械为主，以过程和控制为两翼是过程装备与控制工程的专业特色。为适应这一专业特色和对本科生的培养要求，专业实验的改革应遵循拓宽学生知识面、提高学生动手能力和创新能力的原则。为此我们在北京化工大学和北京市教育委员会支持下，在原化工设备与机械专业实验的基础上，结合新专业的特点，研制开发了多套过程装备与控制工程专业多功能综合实验装置。这些实用性很强的实验装置，不仅能够满足本科生教学实验的要求，还为包括设备结构设计、性能检测、微机自动控制在内的多方面科研工作提供硬件及软件平台。实验装置在硬件和软件方面涉及了变频控制技术，压力、温度、流量、转速及转矩的测试技术，微机数据采集技术，过程控制技术，以及微机通信技术等，体现了集过程、设备及控制于一体的专业特色。

本书共分 2 篇，第 1 篇简单介绍了过程装备与控制工程专业主干课程中与专业实验相关的一些基本知识，包括过程装备中压力容器强度实验和探伤知识；流体机械中的泵和往复式压缩机的基本知识；过程装备控制、检测与诊断技术的基本知识。第 2 篇是过程装备与控制工程专业实验指导，涵盖了本专业主干课程涉及的 21 个实验项目。每个实验项目都详细介绍了该实验的实验目的、实验内容、实验装置、实验原理、实验步骤和实验报告要求，并针对实验内容列出思考题。

本书可作为过程装备与控制工程及相关专业的专业实验教材使用。

本书在编写过程中得到了许多教师和研究生的支持，包括江志农、马润梅、姚琳、魏冬雪、李庆、邓玉婷、张伟、孙晓菊、栗晓蛟、李敏贤、孙胜仁、郝春哲，在此向他们表示衷心的感谢。由于编著者水平有限，书中难免存在缺点和疏漏之处，希望广大读者给予批评指正。

编著者
2012 年 6 月

目 录

第 1 篇 过程装备与控制工程专业实验基础知识	1
1 压力容器实验基础知识	1
1.1 内压力容器应力分布与计算	1
1.2 内压力容器应力测量	3
1.3 压力容器的无损检测	8
2 过程流体机械实验基础知识	18
2.1 离心泵	18
2.2 往复式压缩机的结构与工作过程	22
3 过程设备测试技术基础知识	25
3.1 测量仪表的性能指标	25
3.2 压力测量	27
3.3 温度测量	31
3.4 流量测量	36
3.5 振动测量	40
3.6 计算机测试系统	44
4 过程设备控制实验基础知识	50
4.1 过程控制系统基本结构	50
4.2 PID 调节模型简介	54
5 往复式压缩机气阀故障诊断基础知识	57
5.1 往复式压缩机常见故障及故障特点	57
5.2 故障诊断过程与小波变换	58
第 2 篇 过程装备与控制工程专业实验指导	62
6 过程设备实验	62
6.1 薄壁容器应力测定实验	62
6.2 外压薄壁容器的稳定性实验	66
6.3 爆破片爆破压力测定实验	69
6.4 换热器换热性能实验	72
6.5 流体传热系数测定实验	75
6.6 换热器管程和壳程压力降测定实验	78
6.7 换热器壳体热应力测定实验	80
6.8 超声波探伤实验	85
6.9 安全阀泄放性能测定实验	91
7 过程流体机械实验	97
7.1 离心泵性能测定实验	97

7.2	离心泵汽蚀性能测定实验	101
7.3	往复式空气压缩机性能测定实验	104
7.4	单转子轴临界转速测定实验	108
7.5	往复式压缩机气阀故障诊断实验	112
8	过程装备控制实验	116
8.1	水槽对象特征参数测定实验	116
8.2	调节阀流量特性实验	122
8.3	单回路流量控制实验	126
8.4	单回路压力控制实验	131
8.5	换热器温度串级控制实验	136
8.6	换热器前馈温度控制实验	141
8.7	DDC 编程实验	144
9	过程装备与控制工程专业实验设备	147
9.1	过程设备与控制多功能综合实验台	147
9.2	过程装备与控制工程专业基本实验综合装置	150
参考文献		153

第 1 篇

过程装备与控制工程专业实验基础知识

1 压力容器实验基础知识

压力容器是过程装备的重要组成部分，其相关实验也是过程装备与控制工程专业实验中的重点实验。本章将就内压容器的应力分布与计算、应力测试以及压力容器的无损检测等内容做简单介绍。

1.1 内压力容器应力分布与计算

1.1.1 薄壁圆筒壳体承受内压时的应力

根据材料力学的分析方法，薄壁圆筒在内压 p 作用下，圆筒壁上任一点 B 将产生两个方向的应力：一是由于内压作用于封头上而产生的轴向拉应力，称为经向应力或轴向应力，用 σ_φ 表示；二是由于内压作用使圆筒均匀向外膨胀，在圆周的切线方向产生的拉应力，称为周向应力或环向应力，用 σ_θ 表示。除上述两个应力分量外，器壁中沿壁厚方向还存在着径向应力 σ_r ，但它相对 σ_φ 和 σ_θ 要小的多，所以在薄壁圆筒中不予考虑。于是，可以认为圆筒上任意一点处于二向应力状态，如图 1-1 所示。

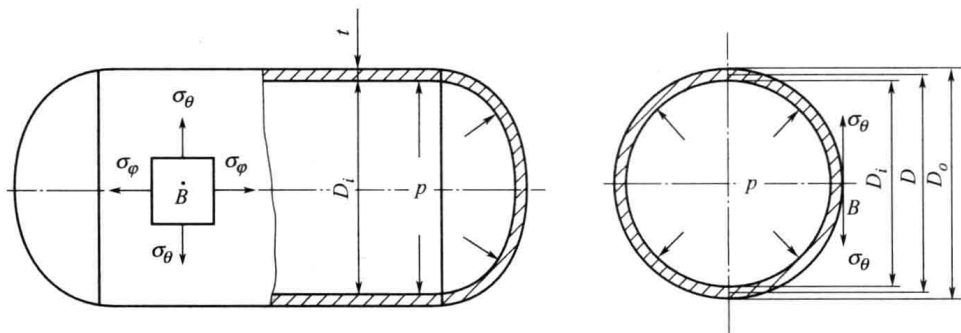


图 1-1 薄壁圆筒在内压作用下的应力

求解 σ_φ 和 σ_θ 可采用截面法。作一个垂直圆筒轴线的横截面，将圆筒分成两部分，保留右边部分，如图 1-2(a) 所示。根据平衡条件，其轴向外力 $\frac{\pi}{4} D_i^2 p$ 必与轴向内力 $\pi D t \sigma_\varphi$ 相等。对于薄壁壳体，可近似认为内直径 D_i 等于壳体的中面直径 D 。

$$\frac{\pi}{4} D_i^2 p = \pi D t \sigma_\varphi$$

由此得

$$\sigma_\varphi = \frac{pD}{4t}$$

从圆筒中取出一单位长度圆环，并通过 y 轴作垂直于 x 轴的平面将圆环截成两半。取其右半部分，如图 1-2(b) 所示，根据平衡条件，半圆环上其 x 方向外力为

$$2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} p R_i \sin \alpha d\alpha$$

必与作用在 y 截面上 x 方向内力 $2\sigma_\theta t$ 相等，得

$$2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} p R_i \sin \alpha d\alpha = 2\sigma_\theta t$$

考虑到 $D \approx 2R_i$ ，由上式得

$$\sigma_\theta = \frac{pD}{2t}$$

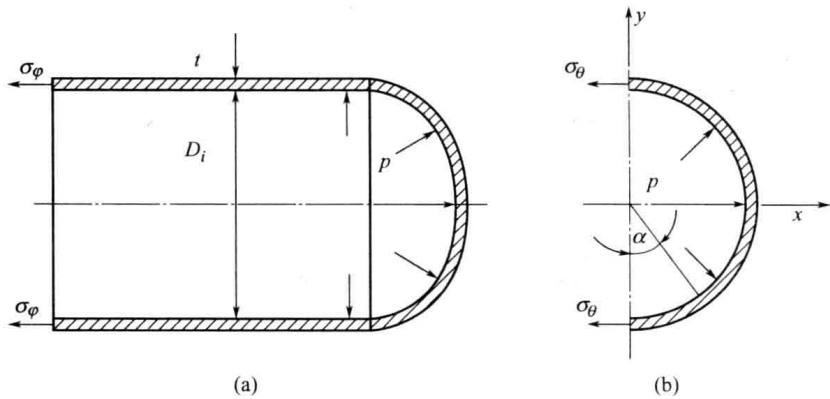


图 1-2 薄壁圆筒在压力作用下的力平衡

1.1.2 椭球形壳体承受内压时的应力

椭球壳应力的大小除与内压 p 、壁厚 t 有关外，还与长轴与短轴之比 a/b 有很大关系，当 $a=b$ 时，椭球壳变成球壳，这时最大应力为圆筒壳中 σ_φ 的一半，随着 a/b 值的增大，椭球壳中应力增大，如图 1-3 所示。

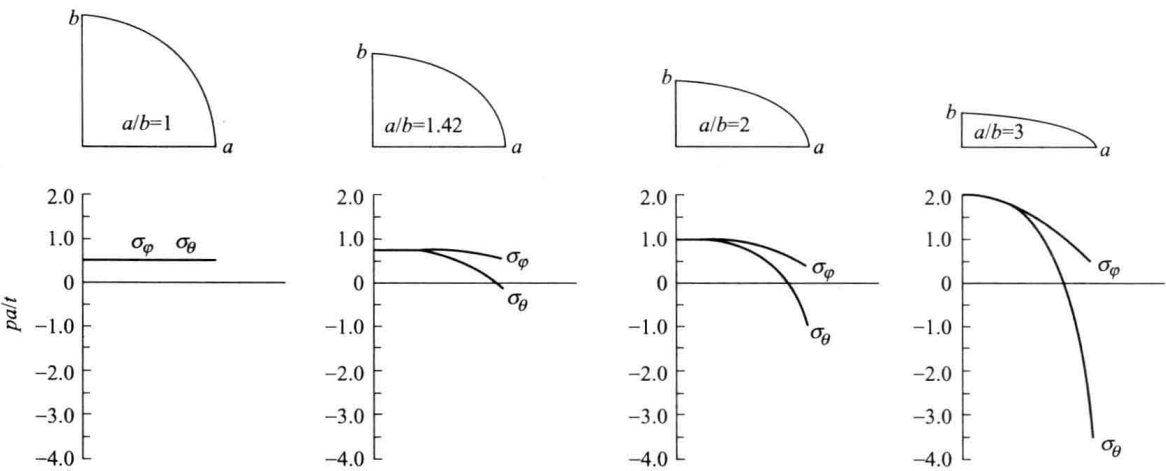


图 1-3 椭球壳中的应力随长轴与短轴之比的变化规律

椭球壳承受均匀内压时，在任何 a/b 值下， σ_φ 恒为正值，即拉伸应力，且由顶点处最大值向赤道处逐渐递减至最小值，当 $a/b > \sqrt{2}$ 时，应力 σ_θ 将变号，即从拉应力变为压应力。随着周向压应力增大，在大直径薄壁椭圆形封头中会出现局部屈曲。这个现象应采用整体或

局部增加厚度及局部采用环状加强构件措施加以预防。

工程上常用标准椭圆形封头，其 $a/b=2$ 。此时， σ_θ 的数值在顶点处和赤道处大小相等但符号相反，即顶点处为 pa/t ，赤道上为 $-pa/t$ ，而 σ_φ 恒为拉伸应力，在顶点处达最大值为 pa/t 。

1.2 内压力容器应力测量

在设计压力容器时，对于结构简单的设备通常采用常规设计的方法进行设计，对于结构复杂的设备往往采用分析设计的方法进行设计。然而对于一些重要的设备或使用场合特殊的设备还需要采用实验应力分析的方法测量设备模型或实际设备的应力，以验证理论计算结果，确保设备安全可靠。

在实验应力分析的方法中，电阻应变测量法的使用最为广泛，通常用于测量设备模型的应力分布和实际设备的在线应力监测等。

1.2.1 电阻应变测量的工作原理

电阻应变片是电阻式传感器，以自身电阻的变化来反映机械应变的变化。在薄壁容器的封头或筒体的表面粘贴电阻应变片，应变片将随容器一起变形，应变片将容器的变形（应变）转换成电阻的变化，再通过电阻应变仪读出应变值，如图 1-4 所示。

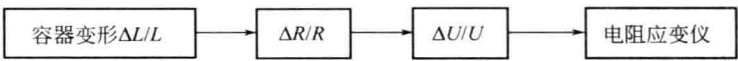


图 1-4 电阻应变测量方框图

(1) 电阻应变片结构

丝绕式电阻应变片常用于建筑结构的应力测试，由基底、栅状电阻丝和覆盖层构成，如图 1-5 所示；箔式电阻应变片常用于压力容器应力测试，由 0.02~0.05mm 厚的箔材和树脂胶膜基底构成，在箔材上经光刻腐蚀工艺形成敏感栅再焊上引线而成，结构如图 1-6 所示。箔式电阻应变片具有制造精度及生产效率高、横向效应小、箔片附着面积大有利散热等特点，因而广泛应用于压力容器的应力测试中。

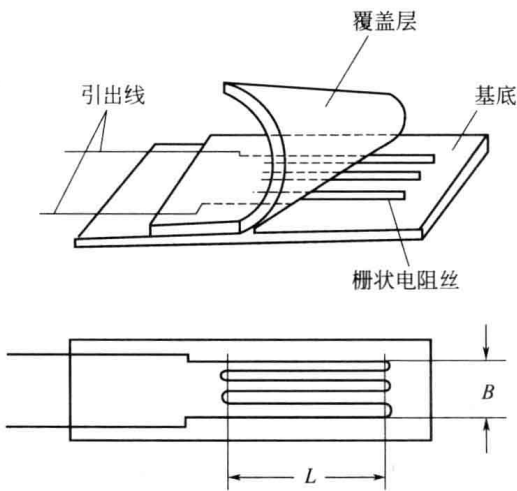


图 1-5 丝绕式电阻应变片结构

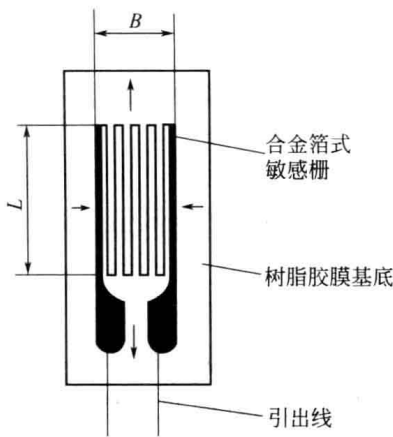


图 1-6 箔式电阻应变片结构

(2) 电阻应变片的主要指标

① 几何尺寸 敏感栅长度 L 和宽度 B ，单位为 mm。应变片的敏感栅长度最短为 0.2mm，最长达 300mm 以上。长度 L 较小的应变片适用于在沿长度方向应力变化梯度较大的场合，尤其在应力集中部位，应选择长度更小的应变片；长度较大的应变片则适用于长度范围内应力较均匀的场合。

② 电阻值 R 常温下应变片的电阻值有 60 Ω 、120 Ω 、350 Ω 、600 Ω 、1000 Ω 等系列，常用的有 120 Ω 和 350 Ω 两种。使用时应依据电阻应变仪的要求选用。在同等条件下选用较高阻值可使应变片发热量减小，对测量有利。

③ 灵敏系数 K 具体介绍见下节。

④ 绝缘电阻 R_m 粘贴后的应变片引出线与容器之间的绝缘电阻，一般要求在 50~100M Ω 以上并能保持稳定值。

⑤ 温度效应 指除了应力产生的电阻变化外，当环境温度变化时所引起的应变片阻值的变化，包括 K 值的变化。

⑥ 横向效应系数 H 在应变片敏感栅的拐弯处有与工作方向垂直的回弯形或直线形的横向栅。敏感栅中的电阻变化包含了横向应变的影响，通常用横向效应系数来表征横向应变的影响程度，如式(1-1) 所示。

$$H = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (1-1)$$

式中 H ——横向效应系数；

ϵ_y —— y 轴方向的应变读数， $\mu\epsilon$ ；

ϵ_x —— x 轴方向的应变读数， $\mu\epsilon$ 。

⑦ 应变极限 应变片所能测量的应变范围是有一定限度的，这个限度称之为应变极限。在一定的温度条件下，应变片的指示应变与试件实际应变的相对误差达到某一规定值（一般为 10%）时，此时的试件实际应变为该应变片的极限应变。

⑧ 零点漂移和蠕变 零点漂移指在温度恒定时，试件未受载荷作用时，贴于试件上的应变片的阻值发生了变化；蠕变指温度恒定时，在对试件施加恒定载荷后，贴于试件上的应变片的阻值随时间出现变化。

⑨ 疲劳寿命 指在恒幅值交变应力作用下由于材料疲劳而致敏感栅、引线断路。以应变片输出值超过正常值时（常用 10%）的循环次数作为疲劳寿命指标。

(3) 应变效应

金属丝随自身结构尺寸而产生的电阻如式(1-2) 所示。

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (1-2)$$

式中 R ——电阻丝的电阻值， Ω ；

ρ ——电阻率， $\Omega \cdot \text{cm}$ ；

l ——电阻丝长度，m；

S ——电阻丝截面积， mm^2 ， $S = \pi r^2$ ， r 为电阻丝半径。

当电阻丝受到拉伸变形时，其长度、截面积、电阻率均会出现 Δl 、 ΔS 、 $\Delta \rho$ 的变化，电阻值也因此产生 ΔR 变化，对式(1-2) 微分后得到

$$dR = \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho l}{S^2} dS + \frac{1}{S} d\rho \quad (1-3)$$

除以式(1-2)得

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho}$$

由于 $dS = 2\pi r dr$, $\frac{dS}{S} = 2 \frac{dr}{r}$

所以
$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \tag{1-4}$$

令: $\frac{dl}{l} = \epsilon_x$, ϵ_x ——电阻丝的轴向应变;

$\frac{dr}{r} = \epsilon_y$, ϵ_y ——电阻丝的径向应变;

$$\frac{dR}{R} = \epsilon_x - 2\epsilon_y + \frac{d\rho}{\rho}$$

当电阻丝沿轴向伸长时, 则沿径向缩小, 二者关系为

$$\epsilon_y = -\mu\epsilon_x$$

式中 μ ——电阻丝材料的泊桑比。

$$\frac{dR}{R} = \epsilon_x - 2\epsilon_y + \frac{d\rho}{\rho} = \epsilon_x + 2\mu\epsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} = (1+2\mu)\epsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} \tag{1-5}$$

$$\frac{dR}{R} = K_0 \epsilon_x \tag{1-6}$$

式(1-6) 中, $K_0 = (1+2\mu) + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\epsilon_x} \tag{1-7}$

K_0 为电阻丝的灵敏系数, 它受以下 2 个因素的影响:

① $(1+2\mu)$ 表示电阻丝几何形状变形关系, 为一常数, 一般在 1.6 左右;

② $\frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\epsilon_x}$ 称为压阻系数, 对大多数电阻丝材料, 压阻系数也是常数。

因此电阻丝的电阻变化率与应变的变化率呈线性关系。影响应变片变形后阻值变化的其他影响因素包括: 基底材料、粘贴剂、应变片横向效应等。考虑到这些因素的影响, 应变片阻值变化与应变关系的综合表达如式(1-8)。

$$\frac{dR}{R} = K \epsilon_x \tag{1-8}$$

式中 K ——电阻应变片的灵敏系数, 由应变片制造厂提供。 K 值一般在 1.7~3.6 之间。

(4) 箔式应变片的形式

箔式应变片的敏感栅的结构形状分为单轴应变片和多轴应变片(应变花)两种。多轴应变片是由两个或两个以上的单轴敏感栅相交成一定角度置于公共基底而成的, 如图 1-7 和图 1-8 所示, 适用于两向以上应力场的测量。

1.2.2 电桥工作原理

使用电阻应变片测量构件的应变, 是以应变片自身的电阻变化来反映应变的变化。例如: 用 $K=2$, $R=120\Omega$ 的应变片贴在构件上, 当构件的应力达到 100MPa 时, 应变片阻值的变化 ΔR 为:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \epsilon$$

$$\Delta R = RK\epsilon = RK \frac{\sigma}{E} = 120 \times 2 \times \frac{100}{2 \times 10^5} = 0.12 \Omega$$

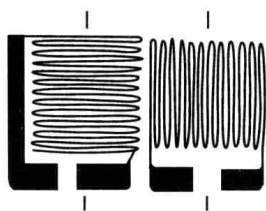


图 1-7 T 形轴应变片

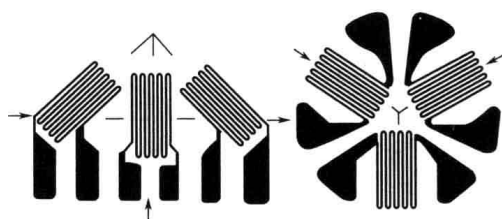


图 1-8 多轴应变片 (应变花)

如此小的电阻变化是很难用欧姆表测量出来，通常采用电桥电路将电阻的微小变化转换成电压的变化，电桥电路如图 1-9 所示。

利用戴维南定理可将图 1-9 中的电桥电路化简成一个等效电源 U' 和一个等效电阻 R' 的叠加，如图 1-10 所示。

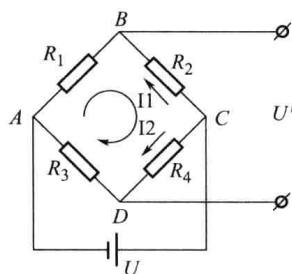


图 1-9 电桥电路图

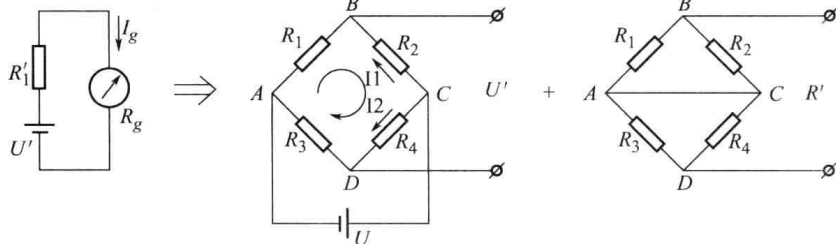


图 1-10 电桥电路的简化图

$$U' = I_2 R_4 - I_1 R_2 = \frac{U}{R_3 + R_4} R_4 - \frac{U}{R_1 + R_2} R_2 = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1-9)$$

$$R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (1-10)$$

$$I_g = \frac{U'}{R_g + R'} = \frac{U(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{R_g(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)} \quad (1-11)$$

若: $I_g = 0$, 则: $R_1 R_4 - R_2 R_3 = 0$

因此有电桥平衡条件: $R_1 R_4 = R_2 R_3$

电桥输出电压:

$$U_g = I_g R_g = \frac{U(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + \frac{1}{R_g}[R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)]} \quad (1-12)$$

当电流表内阻 R_g 很大时, 就相当于电桥的开路电压 U_0 :

$$U_0 = U \frac{(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1-13)$$

若电桥的四个桥臂中只有 R_1 的阻值发生了变化产生 ΔR_1 , 其余三个桥臂电阻的阻值不变, 并设: $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 则有

$$\Delta U_1 = U \frac{(R_1 + \Delta R_1) R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = U \frac{\Delta R_1}{4R + 2\Delta R_1} \quad (1-14)$$

$$\text{由于 } R \gg \Delta R_1, \text{ 略去 } 2\Delta R_1 \text{ 项, 即: } \Delta U_1 = \frac{U}{4} \times \frac{\Delta R_1}{R} = \frac{U}{4} K\epsilon_1 \quad (1-15)$$

同理，当 R_2 , R_3 , R_4 分别发生变化时，有：

$$\Delta U_2 = -\frac{U}{4} \times \frac{\Delta R_2}{R} = -\frac{U}{4} K \epsilon_2 \quad (1-16)$$

$$\Delta U_3 = -\frac{U}{4} \times \frac{\Delta R_3}{R} = -\frac{U}{4} K \epsilon_3 \quad (1-17)$$

$$\Delta U_4 = \frac{U}{4} \times \frac{\Delta R_4}{R} = \frac{U}{4} K \epsilon_4 \quad (1-18)$$

当 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 同时发生变化时，则有： $R_1 + \Delta R_1$, $R_2 + \Delta R_2$, $R_3 + \Delta R_3$, $R_4 + \Delta R_4$ 。

电桥的输出电压： $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4$ ，则有

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \\ &= \frac{U}{4} K (\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3 + \epsilon_4) \end{aligned} \quad (1-19)$$

在图 1-9 电桥电路中，相对桥臂的电阻变化率对总的输出电压 ΔU 来说是相加的，而相邻桥臂电阻变化率是相减的。

1.2.3 应变片的温度补偿

由于制造应变片的金属材料的温度系数不可能为零，因此除应变引起应变片电阻变化之外，应变片的阻值还受温度变化的影响，当测量环境或试件的温度变化时，必须考虑应变片的温度补偿。应变片温度补偿的方法一般采用补偿片补偿法和工作片补偿法。

1.2.3.1 补偿片补偿法

选一块与被测容器相同材料的金属板，在其表面上粘贴一个与工作应变片相同型号、相同阻值 R 和相同灵敏系数 K 的应变片，称其为温度补偿片，将粘有温度补偿片的金属板置于与测量应变片相同的温度条件下，但不得使它受到任何力的作用。将温度补偿片连接到与测量应变片相邻臂上，其余两个桥臂的电阻为固定电阻，此种连接方式称为半桥测量，如图 1-11 所示。

当容器受内压作用并有温度变化时，粘贴于容器表面的测量应变片（设为 R_1 ）受到容器变形和温度变化的双重因素影响而产生电阻变化 ΔR_1 ，温度补偿片（设为 R_2 ）则只有由温度变化而引起的电阻变化 ΔR_{2t} 。由于采用半桥测量 $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ ，根据式(1-19)，测量应变片因温度因素引起的电阻变化 ΔR_{1t} 和温度补偿片因温度因素引起的电阻变化 R_{2t} 因大小相等符号相反而被抵消，实现了温度的自动补偿。

当被测容器上的所有测量应变片都处于相同温度时，可采用一个温度补偿片分别与单个测量应变片构成半桥测量，利用静态电阻应变仪进行逐点切换；但当被测容器上的测量应变片处于不同温度时，如换热器壳体的应力测量，就必须在每个测量应变片旁设置一个温度补偿片，以保证测量的准确。

1.2.3.2 工作片补偿法

测量时如果已知被测构件的应变符号相反或比例关系，温度条件相同的两个点，在这两点上各贴上一个测量应变片并连接到相邻的桥臂上，亦可实现温度补偿。用工作片作温度补偿的实例如图 1-12 所示。

图中构件上贴应变片的位置的温度相同、应变片相同。它们各自由于温度变化所致的电阻变化也相同，由于它们连接在相邻的桥臂上，温度的影响就会自动抵消，而这两个应变片

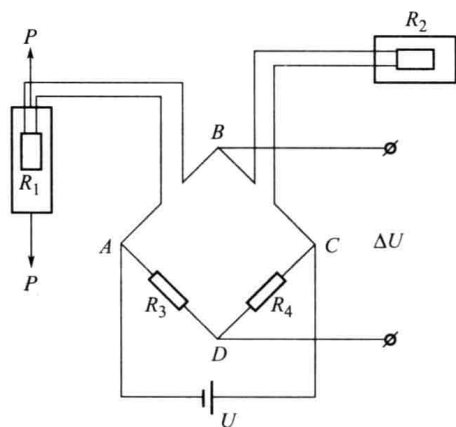


图 1-11 补偿片补偿法

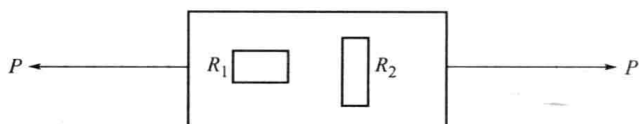


图 1-12 工作片补偿法

所处位置的应变方向相反，测量电桥的输出电压还会比只有一个测量应变片的情况高一些，如式(1-20)。

$$\Delta U = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \mu \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) = \frac{U}{4} (1 + \mu) \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (1-20)$$

1.3 压力容器的无损检测

无损检测是在不损害被检对象的前提下，探测其内部或外表面缺陷的现代检验技术。在工业生产中，许多重要设备的原材料、零部件、焊接接头等必须进行必要的无损检测，当确认其内部和表面不存在危险性或非允许缺陷时，才可以使用或运行。无损检测是检验产品质量，保证产品安全，延长产品寿命的必要和可靠的技术手段。

目前大量应用于压力容器的无损检测技术主要有射线检测、超声波检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测。

1.3.1 射线检测

射线检测通常采用 X 射线对承压设备的焊缝进行无损探伤，通过拍照将焊缝的质量反映到感光胶片上，得到焊缝缺陷的形状和位置。此种方法广泛应用于压力容器制造厂家对产品进行的出厂检测。

1.3.1.1 射线检测的基本原理

射线检测是利用射线在穿透物质时，射线的强度随物质的密度出现不同的衰减，并将穿过物质后的射线记录在感光胶片上，从而实现射线检测。

当强度为 J_0 的一束平行射线，通过厚度为 A 的物质时，射线强度的衰减如下：

$$J_A = J_0 e^{-\mu A} \quad (1-21)$$

式中 J_A ——射线通过物质后的强度；

J_0 ——射线强度；

μ ——物质的线吸收系数，与物质种类及射线能量有关，一般随射线能量的增高而减小。

设射线在透过物质前的强度为 J_0 ，而穿过有缺陷部位后的强度如式(1-22)，穿过无缺陷部位后的强度如式(1-23)：

$$J_1 = J_0 e^{-\mu_2(A-x)} \cdot e^{-\mu_1 x} \quad (1-22)$$

$$J_2 = J_0 e^{-\mu_2 A} \quad (1-23)$$

式中, μ_1 、 μ_2 分别为缺陷和母材的线吸收系数。

射线穿过物体后, 有、无缺陷处的强度比为:

$$\frac{J_1}{J_2} = e^{(\mu_2 - \mu_1)x} \quad (1-24)$$

当母体为金属材料, 缺陷为空气或夹渣时, $\mu_2 \gg \mu_1$, 缺陷沿照射方向的尺寸 x 越大, 或被照射物质与缺陷物质的线吸收系数相差越大, 则照射强度比 J_1/J_2 也越大, 反映在底片上的黑度差也越大, 缺陷也就越容易被发现。

在射线检测前先将感光胶片贴在工件的待检测区域一侧, 检测时将射线照射到工件待检测区域的另一侧, 采用恰当的照射强度和曝光时间对工件待测区域进行拍照。胶片经冲洗处理后得到反映工件待测区域的底片, 可对底片影像所显示的工件缺陷进行评定。

从射线探伤的底片上能够清晰地发现被测工件上的体积形缺陷, 如气孔、夹渣、未焊透等。但对被测工件上的裂纹, 细微未熔合等片状缺陷, 只有在透照方向合适或缺陷较大时才能发现。

1.3.1.2 射线探伤灵敏度

通常采用射线探伤灵敏度表征射线检测所能发现缺陷大小的能力。即使是同一台射线探伤机, 对不同厚度工件进行检测时所能发现的缺陷大小也不相同, 因此采用能够发现的最小缺陷尺寸与待检工件厚度之比来表示射线探伤的灵敏度。一般要求灵敏度达到厚度比 $\leq 2\%$ 或 $\leq 3\%$, 视不同的感光方法而有所不同。

射线检测的灵敏度主要与射线强度及曝光量有关。对于某一射线能量, 当工件厚度增大到一定数值之后, 由于射线在穿透工件之前几乎全部被衰减, 因此, 不管曝光时间多长都不能使胶片感光。同样, 如果用某一合适的射线能量进行拍照时的曝光量选择不合适, 感光后的胶片就有可能反差太小或一片漆黑, 从而无法从底片上观察到缺陷的存在。底片感光合适与否用底片黑度来表示。黑度可用测微光计迅速测出。

射线检测技术分为三级: A 级——低灵敏度技术; AB 级——中灵敏度技术; B 级——高灵敏度技术。承压设备对接焊接接头的射线检测一般采用 AB 级, 对重要设备、结构、特殊材料和特殊焊接工艺的对接焊接接头的射线检测可采用 B 级。

1.3.1.3 射线探伤的缺陷评定和质量分级

对射线底片进行正确的等级评定, 以确定构件质量是射线探伤的最终目的。评定人员要按照射线底片上显示的缺陷形状, 判断缺陷的性质, 然后根据缺陷的性质、大小和数量, 参照标准来确定底片所对应构件的质量等级。

(1) 缺陷类型

对接焊接接头中的缺陷可按性质分为 5 类: 裂纹、未熔合、未焊透、条形缺陷和圆形缺陷。

(2) 质量分级

根据对接焊接接头中存在的缺陷性质、数量和密集程度, 质量等级划分为 I、II、III、IV 级。其中 I 级焊缝质量最高。

焊接接头质量分级的一般规定: I 级对接焊接接头内不允许存在裂纹、未熔合、未焊透

和条形缺陷；Ⅱ级和Ⅲ级对接焊接接头内不允许存在裂纹、未熔合、未焊透；对接焊接接头中缺陷超过Ⅲ级者为Ⅳ级。当各类缺陷评定的质量级别不同时，以上述缺陷类型中质量最差的级别作为对接焊接接头的质量级别。

(3) 圆形缺陷的质量分级

圆形缺陷用圆形缺陷评定区进行质量分级评定，圆形缺陷评定区为一个与焊缝平行的矩形，其尺寸见表 1-1。圆形缺陷评定区应选在缺陷最严重的区域。

表 1-1 缺陷评定区

母材公称厚度 T	$\leq 25\text{mm}$	$>25\sim 100\text{mm}$	$>100\text{mm}$
评定区尺寸	$10\text{mm}\times 10\text{mm}$	$10\text{mm}\times 20\text{mm}$	$10\text{mm}\times 30\text{mm}$

在圆形缺陷评定区内或与圆形缺陷评定区边界线相割的缺陷均应划入评定区内。将评定区的缺陷按表 1-2 的规定换算为点数，按表 1-3 的规定评定对接焊接接头的质量级别。

表 1-2 缺陷点数换算表

缺陷长径/mm	≤ 1	$>1\sim 2$	$>2\sim 3$	$>3\sim 4$	$>4\sim 6$	$>6\sim 8$	>8
缺陷点数/个	1	2	3	6	10	15	25

表 1-3 各级别允许的圆形缺陷点数

评定区/(mm×mm)	10×10			10×20		10×30
母材公称厚度 T/mm	≤ 10	$>10\sim 15$	$>15\sim 25$	$>25\sim 50$	$>50\sim 100$	>100
Ⅰ级/个	1	2	3	4	5	6
Ⅱ级/个	3	6	9	12	15	18
Ⅲ级/个	6	12	18	24	30	36
Ⅳ级/个	缺陷点数大于Ⅲ级或缺陷长径大于 $T/2$					

注：当母材公称厚度不同时，取较薄板的厚度。

圆形缺陷的评判标准如下。

① 由于材质或结构等原因，进行返修可能会产生不利后果的对接焊接接头，各级别的圆形缺陷点数可放宽 1~2 点。

② 对致密性要求高的对接焊接接头，制造方底片评定人员应考虑将圆形缺陷的黑度作为评级的依据。通常将黑度大的圆形缺陷定义为深孔缺陷，当对接焊接接头存在深孔缺陷时，其质量级别应评为Ⅳ级。

③ 当缺陷的尺寸小于表 1-4 的规定时，分级评定时不计该缺陷的点数。质量等级为Ⅰ级的对接焊接接头和母材公称厚度 $T\leq 5\text{mm}$ 的Ⅱ级对接焊接接头，不计点数的缺陷在圆形缺陷评定区内不得多于 10 个，超过时对接焊接接头质量等级应降低一级。

表 1-4 不计点数的缺陷尺寸

母材公称厚度 T/mm	缺陷长径/mm	母材公称厚度 T/mm	缺陷长径/mm
≤ 25	≤ 0.5	>50	$\leq 1.4\%T$
$>25\sim 50$	≤ 0.7		

(4) 条形缺陷的质量分级

条形缺陷按表 1-5 的规定进行分级评定。

表 1-5 各级别对接焊接接头允许的条形缺陷长度 单位: mm

级别	单个条形缺陷最大长度	一组条形缺陷累计最大长度
I 级	不允许	
II 级	$\leq T/3$ (最小可为 4mm)且 ≤ 20	在长度为 12T 的任意选定条形缺陷评定区内,相邻缺陷间距不超过 6L 的任一组条形缺陷的累计长度应不超过 T,但最小可为 4mm
III 级	$\leq 2T/3$ (最小可为 6mm)且 ≤ 30	在长度为 6T 的任意选定条形缺陷评定区内,相邻缺陷间距不超过 3L 的任一组条形缺陷的累计长度应不超过 T,但最小可为 6mm
IV 级	大于 III 级者	

注: 1. L 为该组条形缺陷中最长缺陷本身的长度; T 为母材公称厚度, 当母材公称厚度不同时取较薄板的厚度值。
2. 条形缺陷评定区是指与焊缝方向平行的、具有一定宽度的矩形区, $T \leq 25\text{mm}$, 宽度为 4mm; $25\text{mm} < T \leq 100\text{mm}$, 宽度为 6mm; $T > 100\text{mm}$, 宽度为 8mm。
3. 当两个或两个以上条形缺陷处于同一直线上、且相邻缺陷的间距小于或等于较短缺陷长度时, 应作为 1 个缺陷处理, 且间距也应计入缺陷的长度之中。

(5) 综合评级

在圆形缺陷评定区内同时存在圆形缺陷和条形缺陷时, 应进行综合评级。方法是先对圆形缺陷和条形缺陷分别评定级别, 再将两者级别之和减 1 作为综合评级的质量级别。

1.3.2 超声波检测

1.3.2.1 超声波的传播特点

超声波无损检测是利用超声波在传播过程中当遇到两种介质的分界面时, 超声波就会从分界面上反射回来, 只剩一小部分能透过分界面继续传播的性质。

各种介质对声波的传播都呈现一定的阻抗, 声阻抗与介质的密度及弹性有关。液体的声阻抗比空气的大两千多倍, 而金属的声阻抗比水的又大几十倍。

超声波在传播过程中遇到两种介质的分界面时产生的反射与折射现象如图 1-13 所示。图中 α 为超声波的入射角; α' 为超声波全反射的反射角; β 为超声波遇到不同介质界面时产生折射的折射角。

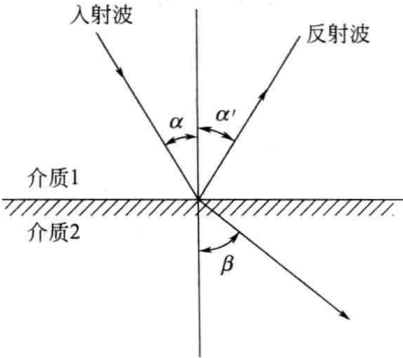


图 1-13 超声波的反射与折射现象

当超声波遇到不同介质界面时产生的折射率如式(1-25) 和式(1-26) 所示。

$$a = \frac{4}{m + \frac{1}{m} + 2} \tag{1-25}$$

$$b = \frac{m + \frac{1}{m} - 2}{m + \frac{1}{m} + 2} \tag{1-26}$$

式中 a ——透射系数;
 b ——反射系数;
 m ——两种介质的声阻抗之比。

若 $m=1$, 表明两种介质的声阻抗相等, 超声波能完全透过, 此时 $a=1, b=0$; 若 $m=0$, 表明两种介质的声阻抗完全不同, 超声波全部反射, 此时 $a=0, b=1$; 当 $1 < m < \infty$ 时, 会有部分超声波反射, 部分超声波出现折射。超声波探伤就是利用超声波的传播特点而实现的。

1.3.2.2 超声波无损探伤原理

(1) 双探头探伤法

探头 1 置于被检工件一侧发射超声波, 探头 2 置于被检工件另一侧用于接收穿透工件超