

渗透探伤

无损检测人员考核培训教材

中国劳动出版社

封面设计:刘林林

ISBN 7-5045-0352-5



9 787504 503527 >

ISBN 7-5045-0352-5/TG · 039 定价: 7.50 元

无损检测人员考核培训教材

渗 透 探 伤

全国锅炉压力容器无损检测人员
资格鉴定考核委员会组织编写

中国劳动出版社

本书为锅炉压力容器Ⅰ级无损检测人员培训教材，文中对渗透探伤的机理、使用的探伤剂、探伤的方法及工艺、探伤装置、缺陷的评定等进行了全面、深入浅出的阐述。渗透探伤作为无损检测中一个较为成熟的探伤方法，已日益在生产、检验中得到广泛的应用。本书是无损检测人员必需的课本，也可作为质量管理人员、设计人员和有关的科研人员、大专院校师生了解无损检测技术的参考资料。

渗 透 探 伤

全国锅炉压力容器无损检测人员

资格鉴定考核委员会组织编写

责任编辑：张伟

劳动人事出版社出版

(北京市和平里中街12号)

北京艺辉胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 6.75印张 164千字

1989年4月北京第1版 1998年6月北京第3次印刷

印数：3000册

ISBN 7-5045-0352-5/TG·039 7.50元

前 言

渗透探伤是无损检测中五种常规检验方法之一，属于非磁性材料表面探伤方法。渗透探伤在生产、检验中应用广泛，已成为无损检测中较为成熟的探伤方法之一。本文叙述了渗透探伤发展的简史和现状，对渗透探伤的物理化学基础，渗透探伤用的各种探伤剂，渗透探伤方法及工艺，渗透探伤装置及缺陷的评定，渗透探伤的应用及质量管理，渗透探伤中的技术安全等进行了深入浅出的详细论述。本书是无损检测人员必需的课本，它也可作为质量管理人员、设计人员和检查人员了解无损检测技术的参考资料。

本文通俗易懂，简明扼要，基本概括了Ⅱ级无损检测人员所必需的渗透探伤专业知识，是全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会组织统编的Ⅱ级人员培训教材之一。由左原相、胡学智、马殿中编写，全国考委会秘书处审定。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者指正。

全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会

1988年7月

目 录

第一章 概述

§ 1-1 渗透探伤的发展简史及现状	1
§ 1-2 渗透探伤的基础知识	1
复习思考题	4

第二章 渗透探伤的物理化学基础

§ 2-1 名词术语	5
§ 2-2 表面张力与表面过剩自由能	7
§ 2-3 液体的分子压强	8
§ 2-4 润湿作用	9
§ 2-5 表面活性与表面活性剂	11
§ 2-6 乳化作用	16
§ 2-7 液体的毛细现象	18
§ 2-8 显象原理	21
§ 2-9 着色强度和荧光强度	22
§ 2-10 溶解度	23
复习思考题	24

第三章 渗透探伤剂

§ 3-1 渗透液	27
§ 3-2 着色液	31
§ 3-3 荧光液	32
§ 3-4 其他类型的渗透液	34
§ 3-5 去除剂	35
§ 3-6 显象剂	36
§ 3-7 国外渗透探伤剂简介	38
§ 3-8 国内渗透探伤剂简介	40
复习思考题	41

第四章 渗透探伤方法

§ 4-1 渗透探伤的六个基本步骤	43
§ 4-2 水洗型渗透探伤	48
§ 4-3 后乳化型渗透探伤	49
§ 4-4 溶剂去除型渗透探伤	52
§ 4-5 特殊的渗透探伤方法	53
复习思考题	54

第五章 渗透探伤装置

§ 5-1 便携式设备及压力喷嘴	56
§ 5-2 渗透探伤分离装置	56
§ 5-3 渗透探伤整体型装置	59
§ 5-4 渗透探伤照明装置	59
§ 5-5 黑光强度检测仪	61
复习思考题	61
第六章 痕迹的解释和缺陷的评定	
§ 6-1 痕迹的解释	63
§ 6-2 缺陷的评定	64
§ 6-3 缺陷的记录	69
§ 6-4 渗透探伤报告	69
复习思考题	70
第七章 渗透探伤的应用	
§ 7-1 焊接件的检验	71
§ 7-2 铸件的检验	71
§ 7-3 锻件的检验	72
§ 7-4 其他零件制品的检验	73
复习思考题	74
第八章 质量管理	
§ 8-1 控制校验用的试块和试件	75
§ 8-2 渗透液性能的校验	77
§ 8-3 乳化剂性能校验	80
§ 8-4 显象剂性能校验	80
§ 8-5 紫外线灯强度的校验	80
§ 8-6 工艺性能的控制校验	81
复习思考题	82
第九章 安全技术	
§ 9-1 防火	83
§ 9-2 劳动卫生	84
复习思考题	86
第十章 实验	
实验一、溶剂清洗型着色液性能比较	87
实验二、后乳化型着色液的配制	88
实验三、溶剂悬浮显象剂的配制	89
实验四、荧光液紫外线光稳定性试验	90
实验五、干粉显象剂的捣实密度	90
实验六、焊缝着色探伤试验	91
附录一、二、三、四	

第一章 概 述

§ 1-1 渗透探伤的发展简史和现状

渗透探伤是一种以毛细管作用原理为基础的检查表面开口缺陷的无损探伤方法, 这种方法是五种常用无损探伤方法(射线、超声波、磁粉、涡流和渗透)中的一种。

利用铁锈检查裂纹, 可以认为是它的初始阶段。户外存放的钢板, 水分渗入了裂纹, 形成了铁锈氧化物, 所以裂纹上的铁锈比其他地方要多。因此, 可以利用铁锈的分布位置及状态去查找钢板上裂纹的分布位置及状态。

“油—白法”公认为是渗透探伤中最早的方法。这种方法是将重滑油稀释在煤油中得到一种混和体作为渗透液, 把零件浸入渗透液中, 一定时间后用浸有煤油的布把零件表面擦净, 再涂一种白粉加酒精的悬浮液, 待酒精自然挥发后, 如果在零件表面有开口缺陷, 则在零件表面均匀的白色背景上出现深黑色显示的缺陷痕迹。

本世纪从30年代到40年代初, 美国人斯威策对渗透液进行了大量的试验。他把着色染料加到渗透液中, 增加了裂纹显示的颜色对比度; 把荧光染料加到渗透液中, 用显象粉显象, 显著地提高了灵敏度, 从而使渗透液探伤进入了新阶段。

随着探伤技术的发展, 国外相继出现了一些专门提供渗透探伤器材和设备的公司, 如美国蔽通公司、英国阿克克斯公司、日本的特殊涂料公司、德国的蒂尔德公司等。

我国50年代初期所采用的荧光液为煤油与滑油的混和物(煤油85%, 滑油15%), 靠滑油本身发光, 荧光亮度很低, 灵敏度也不高。50年代末至60年代初, 有的单位在渗透液内添加荧光黄, 有的单位在渗透液中加入荧光粉, 均提高了荧光亮度和灵敏度。与此同时, 高灵敏度着色液也研制出来。70年代中期, 几个单位协作研制成功了水洗型与后乳化型荧光粉液, 其性能达到国外同类产品水平, 为我国渗透探伤作出了较大贡献。近年来, 低毒型着色探伤液也研制成功。但是, 我国目前渗透探伤设备及材料的制造及定期控制校验尚存不少问题, 渗透探伤方法及标准的质量水平也有待进一步提高。尽管如此, 我国渗透探伤已引起广泛的重视, 并在不断发展和提高中。

§ 1-2 渗透探伤的基础知识

一、渗透探伤的分类

渗透探伤一般分为6种方法, 即水洗型荧光法(FA)、后乳化型荧光法(FB)、溶剂清洗型荧光法(FC)、水洗型着色法(VA)、后乳化型着色法(VB)及溶剂清洗型着色法(VC)等6种。具体也可按下述方法分类。

1. 根据渗透液所含染料成分分类

根据渗透液所含染料成分, 渗透探伤分为荧光法、着色法和荧光着色法三大类。渗透液内含有有色染料, 缺陷图象在白光或日光下显色的为着色法。荧光着色法兼备荧光和着色两

种方法的特点,缺陷图象在白光或日光下能显色,在紫外线下又激发出荧光。

2. 根据渗透液清洗方法分类

根据渗透液清洗方法,渗透探伤分为水洗型、后乳化型和溶剂清洗型三大类。水洗型渗透法是渗透液内含有一定量的乳化剂,零件表面多余的渗透液可直接用水洗掉。后乳化型渗透法的渗透液不能直接用水从零件表面洗掉,必须增加一道乳化工序,即零件表面上多余的渗透液要用乳化剂“乳化”后方用水洗掉。溶剂清洗型渗透法是用有机溶剂清洗零件表面多余的渗透液。

3. 根据显象剂类型分类

根据显象剂类型,渗透探伤分为干式显象、湿式显象两大类。干式显象是以白色微细粉末作为显象剂,撒在经过清洗并干燥后的零件表面上。干式显象剂用(D)表示。湿式显象是将显象粉悬浮于水中(水悬浮显象剂)或溶剂中(溶剂悬浮显象剂)。水悬浮显象剂又称湿式显象剂,以(W)表示。溶剂悬浮显象剂又称速干式显象剂,以(S)表示。湿式显象也可将显象粉溶解于水中(水溶性显象剂)。此外,还有塑料薄膜显象剂,也有不使用显象剂,实现自显象的,自显象以(N)表示。

在上述显象方法中,最常用的是溶剂悬浮显象与干式显象两种,其中干式显象主要与荧光法配合使用。

4. 根据探伤的缺陷是否穿透分类

根据检验缺陷是否穿透,渗透探伤分为表面探伤和检漏法两大类。表面探伤主要检验表面缺陷,检漏法主要检测穿透性缺陷。

二、渗透探伤的操作程序

渗透探伤操作的基本步骤见图1-1。

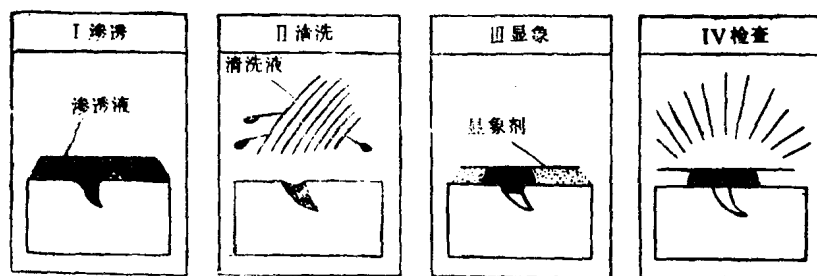


图 1-1 渗透探伤操作的基本步骤

常用的几种渗透探伤方法的操作程序见图1-2。

三、渗透探伤的优缺点

渗透探伤可检查各种表面缺陷,例如裂纹、折叠、气孔、疏松和冷隔等。它不仅可检查黑色及有色金属的铸件、焊接件及锻件等,还可检查陶瓷、塑料及玻璃制品等。它不受材料的组织结构和化学成分的限制,也不受缺陷形状和尺寸的影响。

渗透探伤也有一定的局限性。当零件表面太粗糙时,易造成假象,降低检验效果。粉末冶金零件或其他多孔材料不宜采用此法。

着色法只需在白光或日光下进行,在没有电源的场合下工作。荧光法需要配备黑光灯和

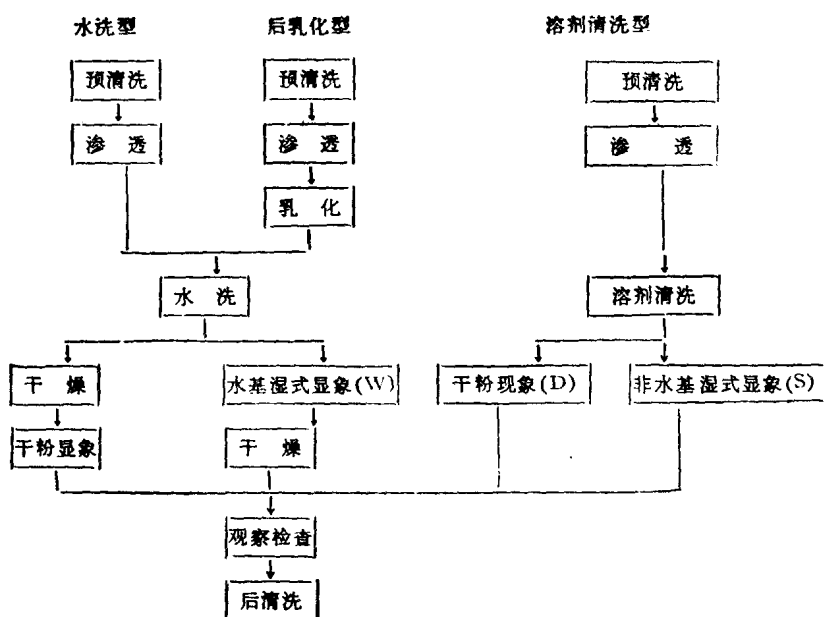


图 1-2 渗透探伤的操作程序

暗室，无法在没有电源及暗室的场合下工作。

水洗型着色法适于检查表面较粗糙的零件，操作简单，成本较低。但该方法灵敏度较低，不易发现细微缺陷。水基型着色法适于检查不能接触油类的特殊零件，但灵敏度很低。

后乳化型着色法应用较广，灵敏度较高，适宜检查较精密零件。

溶剂清洗型着色法应用较广，特别是使用喷罐，可简化操作，适宜于大型零件的局部检查。该法成本较高，手工操作不易掌握，不适于大批量零件的检查。

水洗型荧光法成本较低，有明亮的荧光，易于水洗，检查速度快，适用于表面粗糙、有螺纹、有键槽的零件及大批量小零件的检验。检验灵敏度较低，宽而浅的缺陷容易漏检，表面粗糙度要求高的零件重复检查效果差。水洗操作时容易过洗，荧光液容易被污染。

后乳化型荧光法具有极明亮的荧光，对细小缺陷检查灵敏度高，能检验宽而浅的缺陷，重复检验效果好。但其成本较高，不适用于有螺纹、有键槽及有直孔零件的检验，也不适用于表面粗糙零件的检验。

溶剂清洗型荧光法轻便，适用于局部检查，重复检查效果好，可用于无水源场所。但其成本较高，所用药品易燃易爆挥发，不适用于粗糙表面，清洗操作失误时，检测灵敏度则显著下降。

四、渗透探伤方法的选择

选择具体的渗透探伤方法，首先必须考虑检验灵敏度的要求，同时应考虑零件批量大小，表面状况及几何尺寸，还应考虑检验场所的水源、电源及气源情况、检验费用等。

细小裂纹、宽而浅裂纹、表面粗糙度要求高的零件的检验，宜选用后乳化型荧光法或后乳化型着色法。

疲劳裂纹、磨剥裂纹及其他微小裂纹的检验，宜选用后乳化型荧光法或溶剂清洗型荧光法。

对于批量生产的小零件,宜选用水洗型荧光法或水洗型着色法。

大零件的局部检验,宜选用溶剂型荧光法或溶剂清洗型着色法。

零件表面粗糙时,宜选用水洗型荧光法或水洗型着色法。检验场所无电源及暗室的,宜选用着色法。检验场所无水源及电源时,宜选用溶剂清洗型着色法。

复 习 思 考 题

1. 什么叫渗透探伤?
2. 渗透探伤可以按什么形式分类? 各分为哪几类?
3. 原始渗透探伤方法与现代渗透探伤方法主要区别是什么? 为什么说美国人斯·威·策开创了现代渗透探伤方法的新阶段?
4. 渗透探伤操作有哪几个基本步骤? 水洗型、后乳化型及溶剂清洗型渗透探伤法各有哪几个基本操作程序?
5. 渗透探伤有哪些优缺点?
6. 选择渗透探伤方法的基本原则是什么? 分别叙述下列情况选择什么方法较为适宜?

在役压力容器焊缝的局部检验;

检验场所无电源、水源及暗室;

大批量表面粗糙的小零件的检验;

检验场所无电源、水源及暗室,回工厂后用荧光法校验;

大批量螺纹零件的检验;

疲劳裂纹、晶间腐蚀裂纹、磨削裂纹及其他微小裂纹的检验;

表面粗糙度要求高而且宽而浅的细小裂纹的检验;

盛装液氧的容器(不允许接触油类)的检验;

陶瓷制品的检验。

第二章 渗透探伤的物理化学基础

§ 2-1 名 词 术 语

一、静态渗透参量SP

静态渗透参量SP用下式表示:

$$SP = r_L \cdot \cos\theta \quad (2-1)$$

式中 SP——静态渗透参量;

r_L ——表面张力;

θ ——接触角。

静态渗透参量表征渗透液渗入缺陷的能力。当接触角 $\theta \leq 5^\circ$ 时, $\cos\theta = 1$ 。使用此类渗透液进行渗透探伤, 可得到较满意的检验结果。因此, 就这个意义上说, 静态渗透参量就是当接触角等于或小于 5° 时的表面张力, 即当 $\theta \leq 5^\circ$, $\cos\theta = 1$ 时, $SP = r_L$ 。

二、动态渗透参量KP

动态渗透参量KP用下式表示:

$$KP = \frac{r_L \cdot \cos\theta}{\eta} \quad (2-2)$$

式中 KP——动态渗透参量;

r_L ——表面张力;

θ ——接触角;

η ——粘度。

动态渗透参量表征渗透液的渗透速率, 即受检零件浸入渗透液时所需要的相对停留时间。渗透液粘度值高, 动态渗透参量值要降低, 受检零件浸入渗透液时所需要的相对停留时间要增长。渗透液粘度值太低, 缺陷中的渗透液可能回渗出来, 有可能掩盖各种缺陷。

三、缺陷显示尺寸

缺陷容积(长×宽×深)越大, 所容纳的渗透液就越多, 留在缺陷中输送给显象剂形成显示的渗透液就越多, 缺陷显示越明显。

缺陷的长度是缺陷显示的主要尺寸, 它能提供一个肉眼可观察的实测尺寸。

缺陷越狭(宽度小)、越浅(深度小)、越短(长度小), 越不易发现, 所需的渗透停留时间越长。例如细小的疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹及晶间腐蚀裂纹等, 能提供的缺陷显示尺寸太小, 肉眼很难发现, 以致渗透停留时间常常长达数小时。

试验结果表明: 荧光显示为0.3毫米长, 若以95%的置信度水平进行检测, 大约只有45%的概率能检测出来; 荧光显示为1.1毫米长, 若以95%的置信度水平进行检测, 大约有90%的概率能检测出来。

四、裂纹俘获效率

裂纹俘获效率表征相对于背景及外部光等条件, 裂纹缺陷内的渗透液能形成可用肉眼直

接观察显示的能力。所谓背景是缺陷图形周围的衬底。

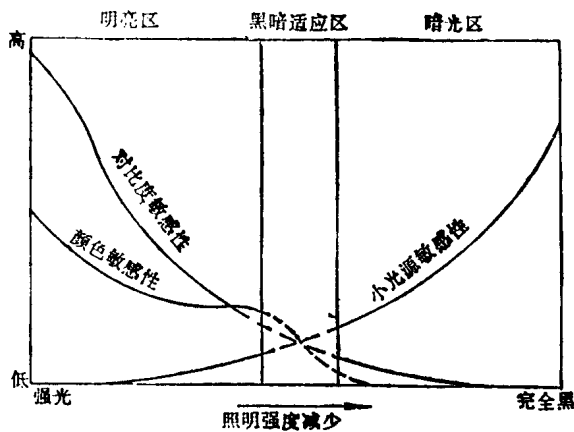


图 2-1 人眼睛敏感特性图

人眼具有复杂的观察机能,见图2-1。

在强白光下,人眼对光强度的微小差别不敏感,而对颜色的辨别能力很强。着色探伤时,红色着色液显示能在白色背景上形成较大的色差,人眼在强白光下的辨别能力很强。暗光中,人眼辨别颜色的本领很差,却能看见微弱发光的物体。人眼直接观察发光的小物体时,感觉到的光源尺寸要比真实物体大,因为人眼有自动放大作用。从明亮处进入黑暗处,必须过一段时间,才能看见周围的东西,这种现象称为黑暗适应;同样,从黑暗处进入明亮处,也需要足够的恢复时间。人的眼睛对各色

光的敏感性是不同时,对黄绿色光最敏感,在黑暗处,黄绿色光具有最好的可见性。荧光探伤时采用的荧光液,在紫外线照射下,发黄绿色荧光,因而缺陷显示在暗室里具有最好的可见性。

试验测量结果表明,从纯白色表面上反射的最大光强度约为入射白光强度的98%,从最黑的表面上反射的最小光强度约为入射白光强度的3%,这表明黑白之间能得到最大的对比率为33:1。实际上要达到这个比值是极不容易的,试验测量结果表明,黑色染料显示与白色显象剂背景之间的对比率为9:1,而红色染料显示与白色显象剂背景之间的对比率都只有6:1。

荧光显示不发荧光的背景之间的对比率值却很高,即使周围环境有微弱的白光存在,这个对比率值仍可达300:1,有时可达1000:1,在完全暗的情况下,对比率值甚至可达无穷大。因为这是发光显示与暗的背景之间的对比率。

着色探伤时,缺陷显示是红色染料显示,背景是色显象剂,二者之间的对比率值约为6:1。荧光探伤时,缺陷里的荧光液在紫外线照射下发黄绿色荧光,背景是黑暗的,二者之间的对比率可达300:1,有时可达1000:1。这种对比率的较大差别,致使荧光探伤有较高的裂纹俘获效率。

裂纹俘获效率可使用带裂纹的试块进行灵敏度试验来测定。利用中间开槽的铝合金淬火试块,可以确定两种不同渗透液或新旧渗透的裂纹俘获效率的相对高低。利用不同尺寸裂纹试块,可以确定渗透液裂纹俘获效率的不同等级。也可使用带有光学平面的凸透镜来测定荧光液的灵敏度,所形成的黑点直径越小,提供显示所需的荧光液薄膜厚度(临界厚度)越薄,裂纹俘获效率越高。

渗透液中染料种类及浓度将影响裂纹俘获效率,如渗透液被化学药品污染,荧光液长时间受紫外线光照射,着色液长时间受强光照射等都将降低裂纹俘获效率。先浸渍后滴落的工艺方法,可使零件表面渗透液之中的大量挥发性成分挥发掉,而在表面上留下更多的粘性组分,染料浓度相对原浸透液中的浓度更高,可提高裂纹俘获效率。

§ 2-2 表面张力与表面过剩自由能

一、表面张力的定义

体积一定的几何形体中，球体的面积最小。因此，一定量的液体自其他形状变为球形时，就伴随着面积的减少。例如荷叶上的大水珠，草叶上的露珠，玻璃板上的水银珠等，如果没有外力影响或影响不大时，液体总是超向于自由收缩成为球状。又例如把一滴水银压扁后再去除压力，则水银珠又会恢复成球状。这种存在于液体表面，使液体表面收缩的力，称为液体的表面张力。

二、表面张力系统

表面张力系统示意图，见图2-2。图中EMNF是金属框，AB是活动边，AB边同相连的两边的摩擦力忽略不计。把液体做成液膜，框在AMNB内。为保持平衡不收缩，就必须施一适当的与液面相切的力 f 于宽度为 l 的液面上。平衡时，如有一个与力 f 大小相等方向相反的力即表面张力存在， l 越大，则 f 值越大。设AB长 l ，实验表面，表面张力可表达为：

$$f = mg = \alpha l \quad (2-3)$$

式中 f ——表面张力，

m ——所挂物体的质量，

g ——重力加速度，

l ——活动边AB的长度，

α ——比例系数，即表面张力系数。

表面张力系数 α 为任一单位长度上的收缩表面的力，也常称为表面张力。它与液体表面相切。实际上，它就是单位长度边界的表面张力，是液体的基本物理性质之一，通常以达因/厘米 (dyne/cm) 或毫牛顿/米 (mN/m) 为单位。

$$1 \text{ dyne} = 1 \text{ mN/m} = 10^{-3} \text{ N/m}$$

一定成分的液体，在一定温度压力下有一定的 α 值，不同液体 α 值不同。一般液体表面张力系数 α 值随温度上升而下降，少数金属的熔融液体的表面张力系数 α 随温度上升而增高，例如铜、镍等金属的熔融液体。

三、表面过剩自由能

所谓“能”是物体做“功”的本领的物理量。“功”的概念是由两个因素所构成，一个是力，另一个是在力作用下使物体沿力的方向上所产生的位移。

表面过剩自由能是单位面积表面分子的自由能占单位面积内部分子的自由能的差值，所以称为表面过剩自由能。表面自由能与表面过剩自由能是有差别的。

如果将图2-2中所示外力 $f(mg)$ 减少 df ，变为 mg ，则液面收缩而上升，同时提升重物 m' 。这表明液膜收缩时可以做功，就是说有自由能。若上升 Δd 厘米，液体表面积缩小 ΔS ，则所做最大功为：

$$\Delta A = f \cdot \Delta d = \alpha \cdot \Delta S \quad (2-4)$$

式中 ΔA ——液膜收缩所做的功，

f ——表面张力，

Δd ——液膜收缩时AB边的移动距离，

α ——表面张力系数，

ΔS ——缩小的液体表面面积， $\Delta S = l \cdot \Delta d$ 。

液体表面面积缩小 ΔS ，做功 ΔA ，使表面过剩自由能缩小 ΔE ；

$$\Delta E = \alpha \cdot \Delta S \quad (2-5)$$

式中 ΔE ——表面过剩自由能，

α 及 ΔS ——同式(2-4)。

表面张力系数 α 在此为单位液体表面的过剩自由能常称为表面过剩自由能。

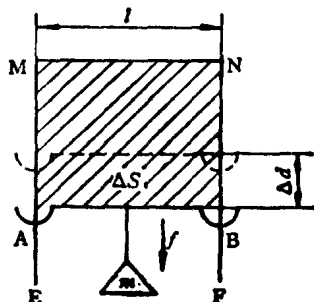


图 2-2 表面张力系数示意图

表面过剩自由能是增加(减少)单位表面面积液体时，自由能的增值(减)，也就是处于液体表面的单位面积分子比处于液体内部同量面积分子的自由能过剩值，通常以尔格/厘米²(erg/cm²)为单位。不难看出，表面张力系数与表面过剩自由能同量纲，同数值。

因此，表面张力系数可看作是表面过剩自由能，它就是将液体表面扩大(缩小)单位面积，表面张力所作之功，这就是表面张力系数的物理意义。如前所述，表面张力越小，液体表面越容易扩大，液体内部分子移至表面所需的能量越小，液体越容易挥发。

表面过剩自由能(或表面张力系数)是液体体系的性质，其数值大小随体系成分而异，并且随温度而改变。一般液体，<100达因/厘米；金属液体、熔盐，几百至几千达因/厘米。

§ 2-3 液体的分子压强

一、自然界的三种物质形态

自然界有三种物质形态，即有气态、液态、固态，相应的介质是气体、液体、固体。

气体分子间的平均距离很大，分子间的自由程比分子本身大许多倍，分子的热运动平均动能足以克服分子间的吸引力。因此，气体分子极易向各方向扩散并充满所给的整个容积。

固体中每一个质点(原子、离子)在自己的平衡位置附近振动，互相之间有很大的吸引力，因此，在固体内，分子不容易扩散。

液体中分子排列比气体紧密得多，分子间的相互作用力较大，但分子热运动的平均动能不足以克服分子间的内聚力，因而液体具有一定的容积。同时，液体内部存在着分子可移动的空“位置”，因此，液体结构形状可变，若置于不同形状的容器中，它就取与该容器相同的外形。

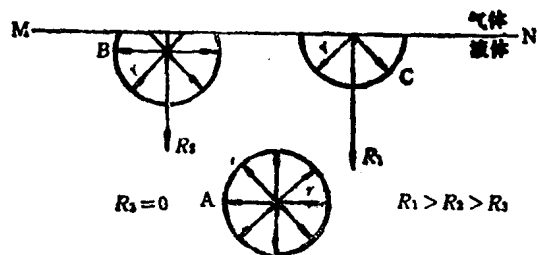


图 2-3 液体表面和内部分子作用球示意图

二、分子作用半径、分子作用球

见图2-3，液体分子相距很近，每一分子都被其他分子包围，互相吸引，分子间的相互作用力随分子间距的扩大而减少。相邻分子间作用力所能达到的最大距离叫做分子作用半

径，用 r 表示。半径为 r 的球形作用范围叫分子作用球。

三、图示法分析分子压强

见图2-3，MN为液体与气体的分界面，A、B及C为液体内部处于不同位置的分子。

分子A处于液体内部，在液体中有大量的其他分子处于分子A的分子作用球内。这些分子作用于分子A上的引力指向各个不同方向，平均地讲，这些引力是互相抵消着的。所以，在液体内部，其他分子对某一分子的作用力，其合力为零。

分子B靠近液体表面。分子C处于液体表面。分子B距液面MN的距离小于分子作用半径 r ，分子C距液面MN的距离为0，即分子作用球只有一部分在液体内部，而另一部分在液体之外。在液体之外，分子作用力就是液面上的气体分子对分子B、C的作用力，其大小与液体内部分子作用力相比是微乎其微的。在液体内部，分子B、C的分子作用球内的分子，对B、C的作用较大，是不能忽略的。所以，从各个方向作用于分子B、C上的引力的合力 R 就不为零。合力 R 的方向指向液体内部，分子距离液面MN越小，合力 R 越大，所以， $R_1 < R_2 < R_3$ 。

综上所述，每一个到液面的距离小于分子作用半径 r 的分子，都受到一个指向液体内部的力的作用。而这些分子组成的表面层，即由表面分子及近表面分子组成的液体表面层，都受到垂直于液面且指向液体内部的力的作用。这种作用力就是表面层对整个液体施加的压力，该压力在单位面积上的平均值叫压强，也叫分子压强。

四、分子压强是表面张力产生的原因

分子压强的本质就是液体内部分子对表面层分子的吸引力，力的方向总是指向液体内部。表面越小，受到此种吸引力的分子数目越少，体系的能量越低，越稳定，所以液体表面有自由收缩使其表面积减小的趋势，这就是表面张力产生的原因。

因此，对小液滴而言，例如荷叶上的小水珠及小水银珠等，在分子压强的作用下，总有取球形状的趋势。因为，体积一定的几何形体，球体的面积最小。对液体而言，液体表面在分子压强的作用下，好象存在着一层紧缩薄膜，这层薄膜使液体表面积收缩至最小。

§ 2-4 润 湿 作 用

一、润湿及润湿剂

物质的相及相之间的分界面称为界面。物质有气、液及固三态，所以有气、液及固三相，可以组成气—液、液—液、气—固与液—固等四种界面。一般把有气相组成的界面称为液体表面及固体表面。

润湿作用是一种表面及界面过程。从最普遍的意义而言，表面上的一种流体被另一种流体所取代的过程就是润湿。

在一般实践中，润湿是指固体表面上的气体被液体取代，有时是一种液体被另一种液体所取代。因此，润湿现象是固体表面结构与性质，固—液两相分子间相互作用等微观特性的宏观表现。

因为水或水溶液是特别常见的取代气体的液体，所以，一般就把能增强水或水溶液取代固体表面空气的物质称为润湿剂。

二、接触角与润湿方程

见图2-4，将一滴液滴在固体平面上，可有三种界面，即有液—气、固—气及固—液界面。与三种界面一一对应，存在三种界面张力。

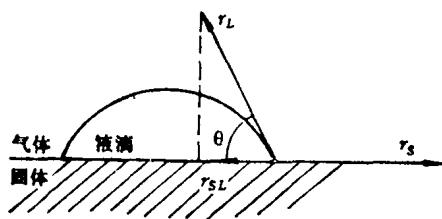


图 2-4 液滴的接触角

液—气界面存在液体与气体的界面张力，即液体的表面张力，它力图使液滴表面收缩，用 r_L 表示。固—气界面存在固体与气体的界面张力，它力图使液滴表面铺开，用 r_s 表示。固—液界面存在固体与液体的界面张力，它力图使液滴表面收缩，用 r_{sL} 表示。液—固界面经过液

体内部到液—气界面之间的夹角称为接触角，以 θ 表示。

当液滴停留在固体平面上时，三种界面张力相平衡，各界面张力与接触角的关系是：

$$r_s - r_{sL} = r_L \cdot \cos\theta \quad (2-6)$$

式中 r_s ——固体与气体的界面张力；

r_L ——液体的表面张力；

r_{sL} ——固体与液体的界面张力；

θ ——接触角。

此式是润湿的基本公式，常称为润湿方程，它可以看作是三相交界处的三种界面张力平衡的结果。

公式 (2-6) 经变换后为：

$$\cos\theta = \frac{r_s - r_{sL}}{r_L}$$

三、润湿的三种方式

润湿有三种方式：沾湿润湿、浸湿润湿及铺展润湿。

沾湿润湿见图2-5所示，它是指液体与固体接触，变液—气界面和固—气界面为固—液界面的过程。

浸湿润湿见图2-6所示，它是指固体浸入液体中的过程，该过程的实质是变固—气界面为固—液界面所代替，而液体表面在过程中无变化。

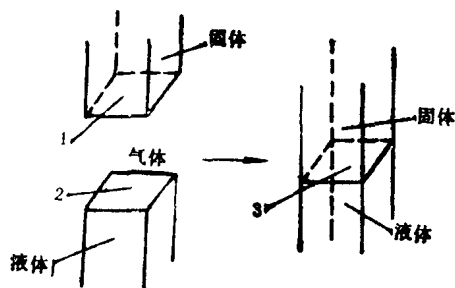


图 2-5 沾湿润湿过程

1—固—气界面；2—液—气界面；3—固—液界面



图 2-6 浸湿润湿过程

铺展润湿见图2-7所示，它的实质是在以固—液界面代替固—气界面的同时，液体表面还同时扩展。