



轨道交通装备无损检测人员资格培训及认证系列教材

渗透 检测技术及应用

万升云 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



轨道交通装备无损检测人员资格培训及认证系列教材

渗透检测技术及应用

万升云 郑小康 章文显 桑劲鹏
贾 敏 高金生 孙元德 段怡雄
石胜平 李来顺 程志义 张香然
姜 岩 鲁传高 葛佳棋 李广立

编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是一本渗透检测人员资格鉴定考核的培训教材,由中国中车焊接和无损检测培训中心组织行业专家按照 ISO/TR 25107:2006《无损检测 无损检测人员培训大纲》、GB/T 9445—2015《无损检测 人员资格鉴定与认证》和 EN 473/ISO 9712:2012《无损检测 人员资格鉴定与认证》标准要求编写。

全书共 9 章,主要的内容包括:渗透检测基础知识、渗透检测的物理化学基础、渗透检测材料、渗透检测器材、渗透检测技术、检测评定、渗透检测应用及缺陷图谱、质量控制与安全防护、渗透检测试验等。为了更好地掌握教材内容,本书还收录了渗透检测术语,国内外渗透检测标准对比分析等内容。

本书既注重理论与实践应用的结合,又紧跟现代科学技术的发展,并及时介绍国内、外渗透检测的新观点和新技术。

本书除作为渗透检测人员资格鉴定考核培训教材外,也可供各企业生产一线人员、质量管理人员、安全监督人员、工艺技术人员、研究机构及大专院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

渗透检测技术及应用 / 万升云等编著. — 北京:

机械工业出版社, 2019.3

轨道交通装备无损检测人员资格培训及认证系列教材

ISBN 978-7-111-62075-4

I. ① 渗… II. ① 万… III. ① 渗透检验—教材 IV.

① TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 033111 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:张维官 责任校对:王颖

版式设计:桑晓东 封面设计:桑晓东

北京联兴盛业印刷股份有限公司印制

2019 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

185mm×260mm·9.5 印张·230 千字

0001—4000 册

ISBN 978-7-111-62075-4

定价:38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

封面无防伪标均为盗版

前 言

渗透检测是无损检测常规方法之一，也是应用历史最久、最广泛、最成熟的方法。目前广泛应用于轨道交通、航空、军工、造船、冶金和机械等行业，在设备和装备制造、检修、运行，以及在产品质量的保证，提高生产率，降低生产成本等方面正发挥着越来越大的作用。

渗透检测应用的正确性、规范性、有效性及可靠性，一方面取决于所采用的技术和装备水平，另一方面取决于检测人员的知识水平和判断能力。无损检测人员所承担的职责要求他们具备相应的无损检测理论知识和综合素质。因此，必须制订相应的规则和程序，对渗透检测相关人员进行培训与考核，鉴定他们是否具备这种资格。

为进一步提高轨道交通装备行业无损检测技术保障水平和能力，研究并建立与国际惯例接轨，适应新时期发展需要的轨道交通行业无损检测人员合格评定制度势在必行。鉴于国内外有关渗透检测方面的著作种类较多，但适用于轨道交通行业无损检测人员资格鉴定与认证要求的教材，尤其是供培训使用及参考的资料几乎没有。为此，中国中车焊接和无损检测培训中心组织行业专家编写了本书。

全书共分为渗透检测基础知识、渗透检测的物理化学基础、渗透检测材料、渗透检测器材、渗透检测技术、检测评定、渗透检测应用及缺陷图谱、质量控制与安全防护和渗透检测试验等9章。

本书通俗易懂，简明扼要，图文并茂，是广大渗透检验人员培训、日常检测必备的工具书，也可作为设计、工艺、管理及检验人员了解渗透检测的参考资料。

本书结合技能操作人员的特点，力求实用，并尽量与欧盟及国际上通行的各国无损检测等级技术培训及认证要求相适应。

在本书的编写过程中，中车科技质量部、中车戚墅堰机车车辆工艺研究

所有限公司各级领导及中车无损检测技术委员会各位委员提供了宝贵的建议和各方面的支持，培训中心的各位同仁进行了缺陷图谱的研制、拍摄、收集及整理工作，并在文字校对等方面做了大量具体的工作，在此向他们表示真诚的谢意。

由于编者水平有限，难免存在诸多不足之处，恳请广大读者不吝指正。愿本书能够为轨道交通装备行业无损检测人员水平的提高、保证无损检测技术的正确应用和促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

本书参考了国内同类教材和培训资料，编写过程中得到许多国内外同行专家的指导和支持，谨此致谢。

编者

目录

前言	III
1 渗透检测基础知识	1
1.1 渗透检测的定义和作用	1
1.2 渗透检测的基本原理	1
1.3 渗透检测的分类	2
1.4 渗透检测操作程序	2
1.5 渗透检测的优缺点	2
1.6 表面缺陷无损检测方法的比较	3
2 渗透检测的物理化学基础	4
2.1 自然界的三种物质形态	4
2.2 表面张力与表面张力系数	4
2.2.1 表面张力	4
2.2.2 表面张力产生的机理	6
2.3 润湿	7
2.3.1 润湿（或不润湿）现象	7
2.3.2 润湿方程与接触角	8
2.3.3 润湿的三种方式和润湿的四个等级	8
2.4 毛细现象	10
2.4.1 毛细现象	10
2.4.2 毛细现象中的液面高度	10
2.4.3 渗透检测中的毛细现象	13
2.5 吸附现象	15
2.5.1 固体表面的吸附现象	15
2.5.2 液体表面的吸附现象	15
2.5.3 物理吸附和化学吸附	16
2.5.4 渗透中的吸附现象	16
2.6 溶解	17

2.6.1	溶解现象及溶解度	17
2.6.2	渗透剂浓度	17
2.7	表面活性与表面活性剂	18
2.7.1	表面活性与表面活性剂的定义	18
2.7.2	表面活性剂的H.L.B 值	19
2.7.3	乳化作用	19
2.8	渗透剂的渗透性	20
2.8.1	静态渗透参量 Static Penetration Parameter (SPP)	20
2.8.2	动态渗透参量 Kinetic Penetration Parameter (KPP)	21
2.9	渗透检测的光学基础	22
2.9.1	光度量术语及单位	22
2.9.2	发光	23
2.9.3	紫外线	24
2.9.4	人眼对光的响应	24
2.9.5	对比度和可见度	25
3	渗透检测材料	27
3.1	渗透剂	27
3.1.1	渗透剂的分类和组成	27
3.1.2	渗透剂的性能	28
3.1.3	着色渗透剂	31
3.1.4	荧光渗透剂	32
3.1.5	特殊用途的渗透剂	33
3.2	去除剂与乳化剂	33
3.2.1	去除剂	33
3.2.2	乳化剂	34
3.2.3	溶剂去除剂	35
3.3	显像剂	35
3.3.1	显像剂的分类及组成	35
3.3.2	显像剂性能	37
3.4	渗透检测材料系统	38
3.4.1	常见的渗透检测材料系统	38
3.4.2	渗透检测材料系统的选择原则	38
4	渗透检测器材	40
4.1	渗透检测装置	40
4.1.1	便携式渗透检测装置	40

4.1.2 固定渗透检测装置	41
4.2 检测场地及光源	45
4.2.1 检测场地	45
4.2.2 检测光源	46
4.3 测量设备	46
4.3.1 紫外线辐照计	46
4.3.2 白光照度计	47
4.3.3 荧光亮度计	47
4.4 渗透检测试块	48
4.4.1 A型试块（铝合金淬火裂纹试块）	48
4.4.2 B型试块（不锈钢镀铬试块）	49
4.4.3 C型试块	50
4.4.4 1型参考试块	51
4.4.5 2型参考试块	52
4.4.6 缺陷试件	53
5 渗透检测技术	54
5.1 渗透检测基本步骤	54
5.1.1 表面准备和预清洗	55
5.1.2 施加渗透剂	59
5.1.3 去除多余的渗透剂	60
5.1.4 干燥	61
5.1.5 显像	62
5.1.6 观察和评定	64
5.1.7 后清洗及复验	65
5.2 缺陷显示及裂纹检出能力	66
5.2.1 缺陷显示	66
5.2.2 裂纹检出能力	67
5.2.3 影响渗透剂渗入开口缺陷的因素	67
5.3 典型渗透检测方法	68
5.3.1 水洗型渗透检测法	68
5.3.2 后乳化型渗透检测法	70
5.3.3 溶剂去除型渗透检测法	72
5.4 渗透检测方法的选用	73
5.5 渗透检测剂系统的选择原则	74
5.6 渗透检测工艺规程	75
5.6.1 工艺规程的基本内容	75

5.6.2 工艺规程实例 76

6 检测评定 78

6.1 显示的解释和评定 78

6.2 显示的分类 78

6.3 缺陷的评定与记录 80

6.3.1 缺陷显示的分类 80

6.3.2 缺陷的分类 81

6.3.3 缺陷显示评定的一般要求 82

6.3.4 缺陷显示记录 82

6.4 渗透检测报告 83

6.4.1 检测报告基本内容 83

6.4.2 检测报告示例 83

7 渗透检测应用及缺陷图谱 85

7.1 焊接件 85

7.1.1 坡口的渗透检测 85

7.1.2 焊接过程中的渗透检测 85

7.1.3 显示评定 86

7.1.4 典型焊接缺陷显示图谱 87

7.2 铸件 90

7.2.1 铸件渗透检测的特点 90

7.2.2 铸件渗透检测要点 91

7.2.3 铝合金铸件的渗透检测 92

7.2.4 显示评定 92

7.2.5 典型铸造缺陷显示图谱 94

7.3 锻件 96

7.3.1 锻件渗透检测的特点 96

7.3.2 锻件渗透检测要点 97

7.3.3 奥氏体不锈钢锻件的渗透检测 98

7.3.4 显示评定 99

7.3.5 典型锻件缺陷显示图谱 99

7.4 热处理件 101

7.4.1 热处理件渗透检测的特点和要点 101

7.4.2 淬火件渗透检测 102

7.4.3 显示评定 102

7.4.4 典型热处理缺陷显示图谱 102

7.5 机械加工件 103

7.5.1 机械加工件渗透检测的特点和要点 103

7.5.2 精加工件渗透检测 103

7.5.3 显示评定 103

7.5.4 典型机械加工缺陷显示图谱 104

7.6 在役件 104

7.6.1 在役件渗透检测的特点和要点 104

7.6.2 钢制在役件的渗透检测 105

7.6.3 显示评定 105

7.6.4 典型在役件缺陷显示图谱 105

8 质量控制与安全防护 106

8.1 质量控制的必要性 106

8.1.1 渗透检测人员 106

8.1.2 渗透检测材料的性能检查 107

8.1.3 渗透检测材料系统的灵敏度鉴定 114

8.1.4 渗透检测材料的质量控制 114

8.1.5 渗透检测器材的质量控制 116

8.1.6 渗透检测工艺操作的质量控制 117

8.2 渗透检测安全防护 119

8.2.1 防火安全 119

8.2.2 卫生安全 120

9 渗透检测试验 122

9.1 试验1：着色渗透检测综合灵敏度校验 122

9.2 试验2：焊缝着色渗透检测 122

9.3 试验3：不同温度下着色渗透材料性能比较 123

附录A 渗透检测术语 125

附录B 国内外渗透检测标准对比分析 128

参考文献 134

1 渗透检测基础知识

1.1 渗透检测的定义和作用

渗透检测是一种以毛细作用原理为基础的检查表面开口缺陷的无损检测方法，这种方法是五种常规无损检测方法（射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测）中的一种，是一门综合性科学技术。

渗透检测以物理、化学、材料科学及工程学理论为基础，在不损坏预期实用性和可用性的前提下，对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检测，从而对其完整性、连续性及安全可靠进行综合评价。渗透检测在铁道行业机车、客车、货车和高速动车组等装备制造及检修过程中获得广泛应用，是实现产品质量控制、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率的重要手段。

1.2 渗透检测的基本原理

渗透检测是一种以毛细作用原理为基础用于检测非多孔性金属和非金属工件表面开口缺陷的无损检测方法。

其工作原理：工件表面被施加含有荧光染料或着色染料的渗透剂后，在毛细作用下，经过一定时间后，渗透剂可以渗入表面开口缺陷中；去除工件表面多余的渗透剂，经干燥后，再在工件表面施加吸附介质——显像剂；在毛细作用和吸附作用下，显像剂将吸引缺陷中的渗透剂，使其回渗到显像剂中；在一定的光源下（黑光或白光），缺陷处的渗透剂痕迹被显示（黄绿色荧光或鲜艳红色），从而探测出缺陷的形貌及分布状态。

渗透检测操作的基本步骤如图1-1所示。

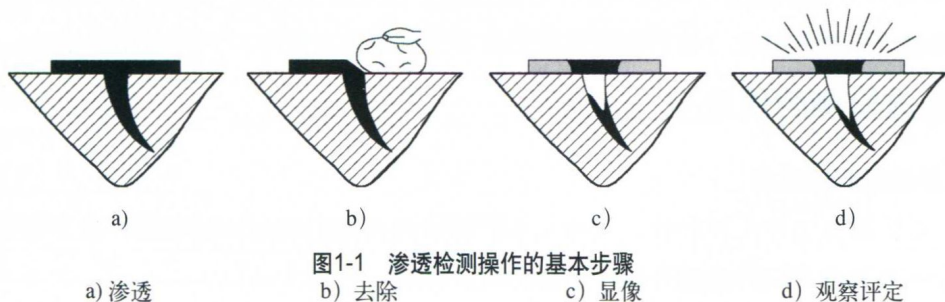


图1-1 渗透检测操作的基本步骤

1.3 渗透检测的分类

1. 根据渗透剂所含染料成分分类

根据渗透剂所含染料成分，渗透检测分为荧光渗透检测法、着色渗透检测法和荧光着色渗透检测法三大类。渗透剂内含有荧光物质，缺陷图像在紫外线下能激发荧光的为荧光法。渗透剂内含有有色染料，缺陷图像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，缺陷图像在白光或日光下能显色，在紫外线下又能激发出荧光。

2. 根据多余渗透剂去除方法分类

根据多余渗透剂去除方法，渗透检测分为水洗型渗透法、后乳化型渗透法和溶剂去除型渗透法三大类。水洗型渗透法是渗透剂内含有一定量的乳化剂，工件表面多余的渗透剂可直接用水去除。有的渗透剂虽不含乳化剂，但溶剂是水，即水基渗透剂，工件表面多余的渗透剂也可直接用水去除，它也属于水洗型渗透法。后乳化型渗透法的渗透剂不能直接用水从工件表面去除，必须增加一道乳化工序，即工件表面上多余的渗透剂要用乳化剂“乳化”后方可用水去除。溶剂去除型渗透法是用有机溶剂去除工件表面多余的渗透剂。

3. 根据显像剂类型分类

根据显像剂类型，渗透检测分为干式显像法、湿式显像法两大类。干式显像法是以白色微细粉末作为显像剂，施加在清洗并干燥后的工件表面上。湿式显像法是将显像粉末悬浮于水中（水悬浮显像剂）或溶剂中（溶剂悬浮显像剂），也可将显像粉末溶解于水中（水溶性显像剂）。此外，还有塑料薄膜显像法；也有不使用显像剂，实现自显像的。

1.4 渗透检测操作程序

水洗法渗透检测操作程序通常包括：预处理、干燥、渗透、水洗、干燥和显像（按照施加显像剂的类型确定前后顺序）、评定和后处理。

溶剂去除渗透检测操作程序通常包括：预处理、干燥、渗透、去除、干燥、显像、评定和后处理。

亲油性后乳化法渗透检测操作程序通常包括：预处理、干燥、渗透、亲油性乳化、水洗、干燥和显像（按照施加显像剂的类型确定前后顺序）、评定和后处理。

亲水性后乳化法渗透检测操作程序通常包括：预处理、干燥、渗透、预水洗、亲水性乳化、终水洗、干燥和显像（按照施加显像剂的类型确定前后顺序）、评定和后处理。

1.5 渗透检测的优缺点

1. 渗透检测的优点

1) 不受被检工件几何形状、尺寸大小、材质和内部组织结构的限制，也不受缺陷方位的限制，一次操作可同时检测开口于表面的所有缺陷。

- 2) 渗透检测不受零件加工工艺限制，可以检测焊接件、铸件、轧制件、锻件及机械加工件等。
- 3) 检测装置结构简单、携带方便，投入成本较低。
- 4) 检测速度较快，操作比较简便，易实现批量检测。
- 5) 易于掌握，检测人员经过较短时间的培训和实践就可以独立地进行操作。
- 6) 缺陷显示直观，检测灵敏度高。

2. 渗透检测的缺点

- 1) 只能检出工件表面开口缺陷。
- 2) 只能检出缺陷的表面分布，难以确定缺陷自身的实际深度。
- 3) 无法或难以检测多孔的材料或表面是吸收性的零件，如粉末冶金零件；也不适用于检测由于外来因素而造成开口被堵塞的缺陷，如工件经喷丸或喷砂处理。
- 4) 对于表面粗糙的工件，会使工件表面的本底颜色或荧光底色增大，难以控制检测操作质量。
- 5) 对零件和环境有污染。

1.6 表面缺陷无损检测方法的比较

渗透检测、磁粉检测和涡流检测都属于表面缺陷无损检测方法，但其方法原理和适用范围区别很大，并且有各自独特的优点和局限性。因此，无损检测人员应熟练掌握这三种检测方法，并能根据工件的材料、状态和检测要求，选择合理的方法进行检测。例如，磁粉检测对铁磁性材料工件的表面和近表面缺陷具有很高的检测灵敏度，可发现微米级宽度的小缺陷，所以对铁磁性材料工件表面和近表面缺陷的检测宜优先选择磁粉检测，因工件结构形状等原因不适合使用磁粉检测时，通常使用渗透检测或涡流检测。

三者的比较见表1-1。

表1-1 渗透检测与磁粉、涡流检测的比较

项目	渗透检测	磁粉检测	涡流检测
工作原理	毛细管作用	磁力作用	电磁感应作用
应用范围	检测	检测	检测、测厚、材料分选、导电率
检测对象	表面开口缺陷	表面及近表面缺陷	表面及近表面缺陷
检测材料	任何非多孔性固体材料	铁磁性材料	导电材料
检测制件	铸件、焊接件、锻件、轧制件、陶瓷件等	锻件、轧制件、铸件、焊接件等	管材、线材、棒材等
检测速度	较慢	快	最快
检测缺陷类型	裂纹、疏松、针孔、夹渣、折叠、冷隔等	裂纹、发纹、白点、折叠、夹渣等	裂纹、折叠、气孔等
缺陷显示	直观	直观	不直观
缺陷显示方法	渗透液回渗	磁粉附着	检测线圈电压、相位变化
污染	高	高	低

2 渗透检测的物理化学基础

2.1 自然界的三种物质形态

自然界物质有三种形态：气态、液态和固态，即气、液及固三相，相应的介质是气体、液体和固体。

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可轻易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，分子热运动的平均动能不足以克服分子间的作用力，因而液体具有一定的体积。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，在液体自身重量的作用下，它就取与该容器相同的外形。

物质相与相之间的分界面称为界面。一般存在如下几种界面：液-气界面、固-气界面、液-液界面和液-固界面。人们已经习惯把有气相参与组成的相界面叫表面，其他的相界面叫界面，例如把液-气界面称为液体表面，把固-气界面称为固体表面，其实两者并无严格区分，常常通用。

在液-气表面，我们把跟气体接触的液体薄层称表面层。在液-固界面，我们把跟固体接触的液体薄层称附着层。表面层的分子，一方面受到液体内部分子的作用，另一方面受到气体分子的作用。附着层的分子，一方面受到液体内部分子的作用，另一方面受到固体分子的作用。

2.2 表面张力与表面张力系数

2.2.1 表面张力

液体的表面层跟液体内部的分子比较起来，是处于特殊状态中，因此就产生了一些特殊的现象。

液体具有流动性。一定量的液体（例如水）置于一定几何形状的容器中，在液体自身重

量的作用下,液体呈容器的几何形状,而且表面是水平的。但是,液体量少时的表面并不是这样。例如,荷叶上的小水滴、草叶上的露珠是近于球形的。又例如,在水平的玻璃片上小水银珠呈球形,大水银珠呈扁平状;如果在呈球形的小水银珠上盖一块玻璃片,小水银珠会被玻璃片压扁。但是,去掉上面盖着的玻璃片,即去除外加的压力,小水银珠又会恢复成球形。大水银珠成扁平状,是因为大水银珠的重量较大,它的形状受到重力的影响也较大。如果可以设法消除水银珠的重量对其形状的影响,那么大水银珠也能呈球形。

体积一定的几何形体中,球体的表面积最小,因此一定量的液体从其他形状变为球形时,就伴随着表面积的减小。另外,液膜也有自动收缩的现象。上述实例都说明,液体表面有收缩到最小的趋势,这是液体表面最基本的特性。

根据力学知识知道,液体能够从其他形状变为球形是由于有力的作用。我们把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。

表面张力试验如图2-1所示。

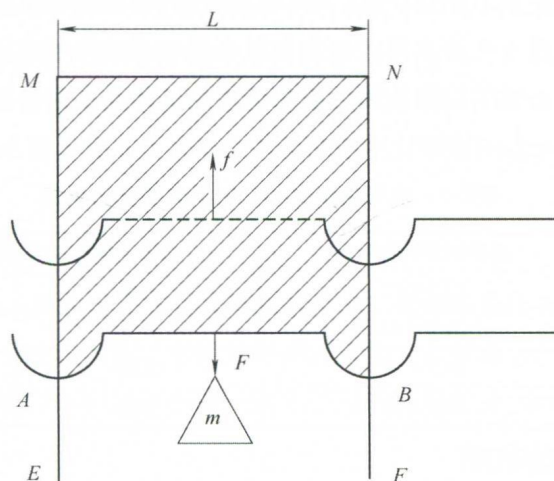


图2-1 表面张力试验

在图2-1中, $EMNF$ 是金属框, AB 是活动边, 假设 AB 边与相连的两边的摩擦力忽略不计。把液体做成液膜(例如肥皂液膜), 框在 $ABNM$ 内, AB 边会在表面张力作用下向使液面缩小的方向(即向上)移动。为保持平衡(不收缩), 就必须施加一适当的与液面相切的力 f 于宽度为 L 的液面上。平衡时这两个力大小相等, 方向相反, 令 AB 为 L , 则有:

$$f = mg = \alpha \cdot L$$

式中 f ——表面张力 (N);

m ——所挂物体的质量 (kg);

g ——重力加速度 (m/s^2);

L ——活动边 AB (液面边界线) 长度 (m);

α ——比例系数，即表面张力系数（mN/m）。

由上式可知，表面张力一般以表面张力系数 α 表示，表面张力系数可定义为单位长度上的表面张力，它的作用方向与液体表面相切。表面张力系数是液体的基本物理性质之一，通常以达因/厘米（dyne/cm）、毫牛顿/米（mN/m）或牛顿/米（N/m）为单位。换算关系如下：

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

在自然界中，体积一定的几何体中球体的面积最小。因此，液体由其他形状变为球形时，其面积就会减小，如露珠、水银珠等。如无外力影响或影响不大时，液体总是自由收缩成球状。

表面张力一般用表面张力系数来 α 来表示。表面张力系数 α 是任一单位长度上的收缩表面的力，法定单位为牛顿/米（N/m），它的作用方向与该液体表面相切。当液体表面张力系数小时，该液体的表面能就小，这时液体就容易挥发。

一般而言，表面张力系数与液体的种类和温度有关，对于一定成分的液体，在一定的温度和压力下有一定的表面张力系数 α 值。不同的液体其表面张力系数 α 值不同。同一液体，表面张力数系 α 值随温度上升而下降；但有少数金属熔融液体的表面张力系数值随温度上升而增高，例如铜、镉等金属的熔融液体，容易挥发的液体与不容易挥发的液体相比，其表面张力系数 α 更小，含有杂质的液体比纯净的液体表面张力系数 α 要小。

表2-1 常用液体在20℃时的表面张力系数

液体名称	表面张力系数/N·m ⁻¹	液体名称	表面张力系数/N·m ⁻¹
水	72.3 × 10 ⁻³	丙酮	23.7 × 10 ⁻³
苯	28.9 × 10 ⁻³	煤油	23.0 × 10 ⁻³
松节油	28.8 × 10 ⁻³	乙醇	23.0 × 10 ⁻³
甲苯	28.4 × 10 ⁻³	乙醚	7.0 × 10 ⁻³

2.2.2 表面张力产生的机理

物质是以气态、液态、固态三种形式存于自然界中，其中气体的分子间距离很大，因此极易扩散；而固体中每个分子在平衡位置附近振动，其相互间吸引力很大，因此不易扩散；液体分子排列比气体密，分子间相互作用较大，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体积，同时由于液体内部存在分子可移动的“空位”，因此液体可根据容器的不同而改变外形。

液体表面和内部分子作用如图2-2所示。分子 M_1 处于液体内部，其他分子对分子 M_1 的作用力合力为零。分子 M_2 靠近液体表面，其距离液面的距离小于作用半径，分子 M_3 处于液体表面，其距离液面的距离为零。在液体之外，分子作用力就是液面上的气体分子对分子 M_2 和 M_3 的作用力，由于其大小与液体内分子作用力相比是微乎其微的，所以分子 M_2 和 M_3 上的作用力合力不为零。其方向指向液体内部，分子距离液面越近，则合力越大。

也就是由表面分子与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，这是对整体液体施加的压力。该压力在单位面积上的平均值叫压强，也叫分子压强。

分子压强是表面张力产生的原因。

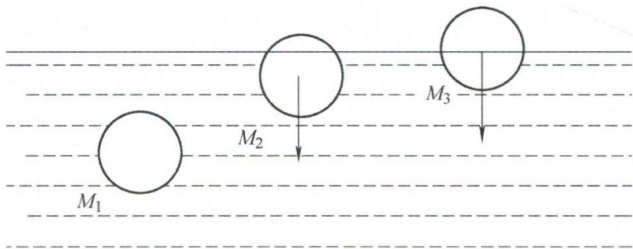


图2-2 液体表面和内部分子作用示意

表面张力系数 α 也可理解为单位液体表面的过剩自由能，通常称为表面过剩自由能。它的意义是增加（减少）单位表面面积液体时，自由能的增值（减值），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。这时 α 的单位为 J/m^2 （焦耳/平方米）。因此，表面张力系数可看作是表面过剩自由能，它就是缩小单位液体表面面积、表面张力所做的功，这就是表面张力系数的物理意义。

2.3 润湿

2.3.1 润湿（或不润湿）现象

如果在玻璃板上放一滴水银，它总是收缩成球形，能够滚来滚去而不润湿玻璃，这种现象就叫做不润湿现象。对玻璃来说，水银是不润湿液体。如果清洁的玻璃板放一滴水，它非但不收缩成球形，而且要向外扩展，形成一薄片，这种现象就称作润湿现象。水是玻璃的润湿液体。

把液体装在它能润湿的容器里，靠近内壁处的液面呈上弯的形状，如图2-3a所示。把液体装在它不润湿的容器里，靠近内壁处的液面呈向下弯的形状，如图2-3b所示。对内径小的容器来说，这种现象更为显著，整个液面呈弯月形，俗你“弯月面”。

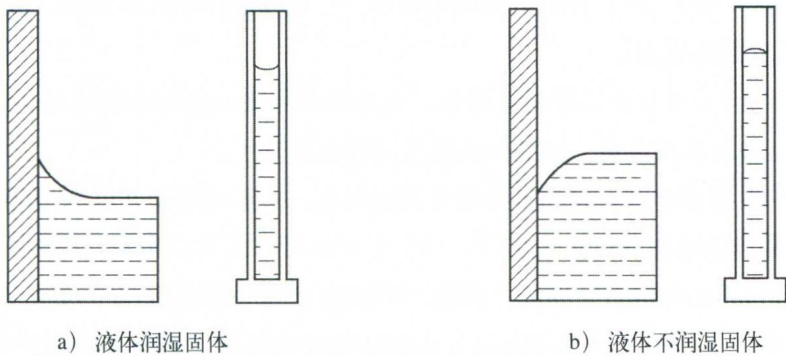


图2-3 润湿（或不润湿）现象