

无损检测 II 级培训教材

渗透检验

SHENTOU
JIANYAN



机械工程学会无损检测学会 编

机械工业出版社



无损检测Ⅱ级培训教材

渗透检验

中国机械工程学会无损检测学会 编著



机械工业出版社

本书是无损检测学会向全国推荐的Ⅱ级人员培训通用教材之一（全套教材计有五册：超声、射线、磁粉、渗透、涡流检测）。书中较详细地介绍了渗透检验方法的物理基础、渗透剂、去除剂、显象剂、渗透检验设备、各种渗透检验工艺、检验结果的解释和评定、缺陷的分类及渗透检验所用材料、设备、工艺的控制校验等。

本书在编写过程中参考了美国无损检测学会所推荐的渗透检验人员培训参考资料及英国罗尔斯-罗伊斯公司和加拿大普朗特-惠特尼公司的渗透检验培训教材。书中文字通俗易懂；插图 63 幅。

本书可供从事无损检测工作的工人学习使用；也可供技术人员、质量管理人员及无损检测专业的师生参考。

无损检测Ⅱ级培训教材

渗透检验

（重排本）

中国机械工程学会无损检测学会 编著

责任编辑：武江、方婉莹

责任印制：张俊民

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $3\frac{5}{8}$ ·字数 91 千字

1986 年 6 月北京第一版·1990 年 8 月北京第二次印刷

印数 6,201—9,430·定价：2.60 元

ISBN 7-111-02358-7/O·54

前 言

无损检测技术是实现产品质量控制、保证机械装备安全运行的重要手段之一。当前，全国各地已开始进行对无损检测人员技术培训和资格鉴定工作，急需适用的培训教材。Ⅱ级人员处于工业生产第一线，担负着日常检验工作，并需签发检验报告、对检验结果负责。为确保受检产品的质量，必须加速对Ⅱ级人员的培训和资格鉴定，这是一项紧迫而又繁重的任务。

为了逐步适应广泛国际经济技术合作的需要，我国与国外无损检测学会的人员资格互认的时机也正趋成熟。这就要求有一套与各国水平协调的全国统一的无损检测培训通用教材。为此，中国机械工程学会无损检测学会在全国范围内组织力量编写了无损检测五种常规方法教材，推荐作为全国无损检测Ⅱ级人员培训的通用教材。《渗透检验》就是其中的一本。

本书较详细地介绍了渗透检验方法的物理基础、渗透剂、去除剂、显象剂、渗透检验设备、各种渗透检验工艺、对检验结果的解释和评定、缺陷的分类及渗透检验所用材料、设备、工艺的控制校验等。全书共九章并附有插图 63 幅；内容通俗易懂；正式出版前曾经在西安、北京等地多次试用。

本书由周大应主编；曾由航空无损检测人员资格鉴定委员会审稿；再经中国机械工程学会无损检测学会渗透探伤专业组审定。参加本书审稿工作的人员有：邓日红、谢昂、丁大容、俞康桢、孙殿寿、陈时宗、归锦华、马幼良等。

这套教材在组织编写过程中陶亨咸、应崇福、赖坚、许绍高、程瑞全、王务同、张企耀等同志曾直接予以指导、支持；郑文仪、王支嵘同志对本书提出了许多宝贵意见，谨此表示感谢。

由于作者水平有限，错误和缺点在所难免，恳请读者指正。

1985 年 11 月

447 97/07

目 录

前言	
绪言	1
第一章 液体渗透检验的物理基础	5
第一节 毛细作用	6
第二节 紫外线和荧光	8
第三节 对比度和可见度	9
第二章 液体渗透剂	12
第一节 理想的渗透剂	12
第二节 渗透剂的物理化学性能	13
第三节 渗透剂的组分	18
第四节 水洗型荧光渗透剂	20
第五节 后乳化型荧光渗透剂	21
第六节 溶剂去除型渗透剂	22
第七节 其它用途的渗透剂	23
第三章 显象剂	26
第一节 显象剂的性能要求	26
第二节 显象剂的种类	26
第三节 显象剂的物理化学性能	29
第四章 去除剂	31
第一节 表面活性剂的乳化作用	31
第二节 表面活性剂的亲水性	32
第三节 乳化剂	33
第四节 渗透检验用的乳化剂的性能要求	35
第五章 渗透检验的六个基本步骤	37
第一节 表面准备和预清洗	37
第二节 渗透	41
第三节 去除表面多余的渗透剂	42

第四节	干燥	44
第五节	显象	45
第六节	检验	46
第六章	渗透检验装置	48
第一节	预清洗装置	48
第二节	零件筐、渗透剂槽和滴落架	49
第三节	乳化剂槽和滴落架	50
第四节	水洗装置	51
第五节	热空气循环干燥装置	53
第六节	显象装置	54
第七节	黑光灯和黑光强度检测仪	55
第八节	整体型装置	60
第九节	静电喷涂装置	62
第十节	便携式压力喷罐装置	64
第七章	渗透检验方法	66
第一节	水洗型荧光渗透检验	66
第二节	后乳化型荧光渗透检验	68
第三节	溶剂去除型着色渗透检验	72
第四节	渗透检验方法的选择	74
第五节	用渗透剂探测泄漏的方法	76
第六节	几种特殊的渗透检验方法	77
第八章	显示的解释和缺陷的评定	80
第一节	显示的分类	80
第二节	真实显示的分类	83
第三节	缺陷的分类	84
第四节	渗透检验能发现的常见缺陷	85
第五节	缺陷的评定	93
第九章	渗透检验材料和设备的质量控制	95
第一节	控制校验用的试片和试件	95
第二节	工艺性能的控制校验	99
第三节	渗透剂去除性的校验	99
第四节	乳化剂性能的校验	101

第五节 显象剂的校验	102
第六节 荧光渗透剂亮度的比较测定	103
第七节 渗透剂的含水量和容水量的测定	103
第八节 渗透剂的腐蚀性试验	104
第九节 黑点试验	105
第十节 黑光灯强度的校验	106
参考文献	107

绪 言

机器、设备和工具的生产，都期望得到最大的使用可靠性，期望在预期的使用寿命期限内，产品的部分或整体不发生破损。为达到此目的，不仅要求对产品进行合理的设计，对产品的制造工艺和制造过程进行严格的控制，还要求用最可靠的方法检验出材料或零件中的各种缺陷，按有关的质量验收标准对其作出评价，从而确保只让合格的产品投入使用。无损探伤就是在不破坏被检测材料或零件的前提下，能探测出材料或零件内部和表面缺陷的可靠检验方法，是产品质量检查的有力手段。

为制造出符合设计标准要求的产品，需要确定合格的制造工艺。通常可预先制定或选定一种制造工艺进行试制。必要时，对试制品进行无损探伤，根据探伤结果来衡量预定的制造工艺是否可行，从而帮助确定出满意的制造工艺。

在零件制造过程中的较早阶段，对毛料或半成品进行无损探伤，是很有价值的。这样可在零件制造的初期把不合格品挑选出来，避免盲目加工，节省加工费用。在加工初期发现问题，还可以在以后加工过程中有目的地去除掉缺陷或采取补救手段挽救零件，节约材料，降低制造成本。

零件上裂纹处的断裂强度除了与外加应力的 大小 、 方向 和载荷性质有关外，还取决于裂纹的 大小 、 形状 、 方向 、 位置 和分布状态。断裂理论还告诉我们，零件的表面裂纹比内部裂纹具有更大的危险性。因此，为确保产品的使用可靠性，所有零件在成品阶段都必须进行表面质量检验，检验方法通常为目视、磁粉探伤、涡流探伤、腐蚀检验和渗透检验等。本教材将对液体渗透检验方法予以介绍。

液体渗透检验是检测非松孔性固体材料表面开口缺陷的一种

无损探伤方法。这种方法的主要优点是：

不受被检零件的形状、大小、组织结构、化学成分和缺陷方位的影响；

操作简单，检验人员经过较短时间的培训就可独立地进行操作；

不需要特别复杂的设备，检验费用低；

缺陷显示直观，检验灵敏度高；

对复杂零件可一次检查出各种方向的缺陷。

因此，液体渗透检验被广泛用于锻件、铸件、焊接件、各种机加工的零件及陶瓷、玻璃、塑料、粉末冶金等零件的表面质量检验。

随着机械工业尤其是宇航工业的发展，铝合金、镁合金、钛合金、奥氏体不锈钢、玻璃钢、塑料等非铁磁性材料的应用愈来愈广泛，这些材料制成的零件不能进行磁粉探伤。有些铁磁性材料制造的零件，由于零件的几何形状、尺寸的关系而不适合进行磁粉探伤；常被渗透检验方法所代替。因此，宇航工业生产中渗透检验在零件探伤方面的比例愈来愈大，渗透检验在宇航工业中的作用也愈来愈大。

用炭黑涂在陶器的表面上，再擦净表面，裂纹就可显现出来，这是陶瓷厂检查陶器的传统方法。采用浸油的方法检验表面裂纹是一种原始的液体渗透方法，这种方法后来配合以白粉显象检验，称之为“油-白法”而得到广泛应用。“油-白法”被公认为液体渗透检验最早的方法。

“油-白法”最初在铁道工业部门得到应用。这种方法是将重滑油稀释在煤油中得到一种看上去是脏而黑的混合液体作为渗透剂，机车零件，如杆、轴、曲柄等，用氢氧化钠溶液煮洗并干燥后，浸入渗透剂中，过几小时甚至二十四小时以上，取出零件，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，在零件表面形成均匀的白色背景上出现深黑色渗透剂显示的裂纹。

本世纪三十年代，磁粉探伤方法在机车维修上得到了广泛的应用，很多用“油-白法”检验过没发现裂纹的零件，用磁粉探伤法仍能发现裂纹。加之磁粉探伤方法裂纹显示清晰，因而“油-白法”愈来愈多地被磁粉探伤所代替。

为了探测非铁磁性材料的表面裂纹，人们再次把注意力转移到“油-白法”上，从三十年代到四十年代初，美国人斯威策对渗透剂进行了大量的试验，他把着色染料加到渗透剂中，增加了裂纹显示的颜色对比度。1941年，斯威策把荧光染料加到渗透剂中，利用显象粉显象，并在紫外灯下检验裂纹，从而显著地提高了检验灵敏度，使液体渗透检验进入了新阶段。于是，液体渗透检验与射线、磁粉探伤一起成了当时最广泛应用的三种探伤方法。

液体渗透检验方法作为一种可靠的检验方法，在航空工厂特别受到重视，为了取得最好的试验结果，要求尽可能采用新的试验方法和优质的渗透试验材料及设备，到目前为止已形成了以下六个完整的渗透检验方法：

1. 水洗型荧光渗透检验法；
2. 后乳化型荧光渗透检验法；
3. 溶剂去除型荧光渗透检验法；
4. 水洗型着色渗透检验法；
5. 后乳化型着色渗透检验法；
6. 溶剂去除型着色渗透检验法。

渗透检验工作本身的质量是由进行渗透检验所用的设备、材料、方法、标准的质量水平所决定的。为确保渗透检验工作的质量，除了选用最合适的设备、材料、方法和标准外，还应对购买的和使用中的设备和材料进行定期的控制校验，对试验的全过程进行严格的控制。

渗透检验这种最早被人们采用的一种无损探伤方法虽然比较简单，但目前仍在工业生产中，尤其在航空工业生产中发挥着重要的作用，占有重要的地位。渗透检验结果的可靠性在很大程度上

上依赖于从事渗透检验人员的知识水平和实践经验。如果对渗透检验的基本知识缺乏了解，就不能正确地应用这种有效的检验手段。为确保渗透检验工作的质量，凡从事渗透检验的人员，应经过系统的专业培训和考试，考试合格并且视力符合要求，取得资格证书，才能从事在资格证上所规定的级别的渗透检验工作。

第一章 液体渗透检验的物理基础

渗透检验是将一种含有染料的渗透剂涂覆在零件表面上，在毛细作用下，渗透剂渗入表面开口的缺陷中去，然后去除掉零件表面上多余的渗透剂，再在零件表面涂上一薄层显象剂，缺陷中的渗透剂在毛细作用下重新被吸附到零件表面上来而形成放大的缺陷显示，在黑光灯下（荧光检验法）或在白光灯下（着色检验法）观察缺陷显示。渗透检验的最基本步骤是渗透、清洗、显象和检验，见图 1-1 所示。

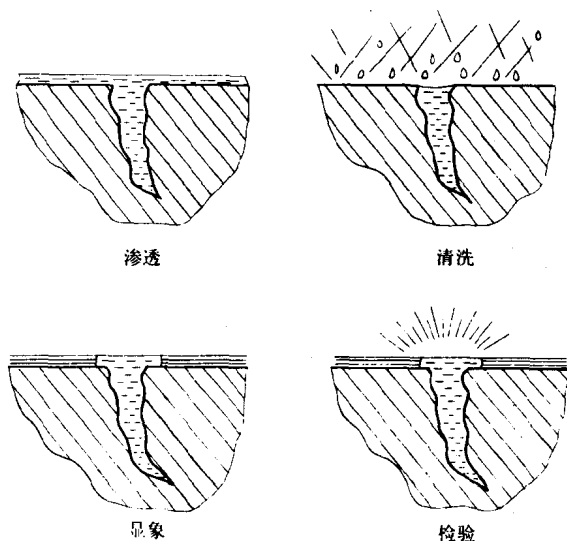


图 1-1 荧光渗透检验的基本过程

第一节 毛细作用

一、表面张力

液体的表面张力是两个共存相之间出现的一种界面现象，是液体表面层收缩趋势的表现。表面张力可以用液面对单位长度边界线的作用力来表示，即用表面张力系数来表示，其单位为达因/厘米。^① 液体表面层中的分子一方面受到液体内部分子的吸引力，称为内聚力；另一方面受到其相邻的气体分子的吸引力。由于后一种吸引力比内聚力小，因而液体表面层中的分子有被拉进液体内部的趋势，结果引起了表面收缩。一般地说，容易挥发的液体（如丙酮、酒精）的表面张力系数要比不容易挥发的液体（如水银）的表面张力系数小，同一种液体在高温时比在低温时表面张力系数要小，含有杂质的液体比纯净的液体表面张力系数要小。

二、接触角

液体和固体接触时，出现两种不同的情况，一种是如同水滴在无油脂玻璃板上那样，水滴沿玻璃面慢慢散开，即液体与固体表面的接触面有扩大的趋势，这是液体润湿固体表面的现象，如图 1-2 所示。另一种现象就象水银滴在玻璃上收缩成水银珠那样，即液体与固体表面的接触面有缩小的趋势，这是液体不润湿固体表面的现象，如图 1-3 所示。图中 θ 角叫做液体对固体表面的接触角。接触角是液面在接触点的切线与包括该液体的固体表面之间的夹角。一种液体对某种固体表面的接触角小于 90° 时，我们称该液体对该固体表面是润湿的。接触角愈小，说明液体对固体表面润湿能力愈好。



图 1-2 液体润湿固体表面

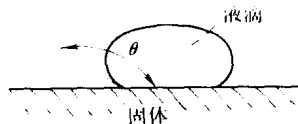


图 1-3 液体不润湿固体表面

① 1 达因/厘米 (dyn/cm) = 10^{-3} 牛/米 (N/m)。

液体与固体表面接触时, 润湿和不润湿现象, 是由液体分子间的引力和液体与固体分子间的引力的大小来决定的。前者为液体中的内聚力, 后者为液体和固体间的附着力。附着力大于液体分子间的内聚力时, 液体沿固体表面扩散开来, 发生润湿现象; 液体分子间的内聚力大于液体和固体间的附着力时, 液体在固体表面上收缩成珠, 发生不润湿现象。同一种液体, 对不同的固体来说, 可能是润湿的, 也可能是不润湿的。水能润湿无油脂的玻璃, 但不能润湿石蜡; 水银不能润湿玻璃, 但能润湿干净的锌板。

内聚力大的液体, 其表面张力系数也大, 对固体表面的接触角也大, 因此, 液体的表面张力与液体对固体表面的接触角成正比, 即液体的表面张力系数愈大, 对同样的固体表面的接触角也愈大, 反之亦然。

三、毛细作用

如果把内径小于 1 毫米的玻璃管 (称毛细管) 插入盛有水的容器中, 水即沿着管内壁自动地上升, 使玻璃管中液面高出容器里的液面, 见图 1-4。这种能使水在毛细管中自动上升的力, 称为毛细作用。

水是润湿玻璃管壁的, 润湿管壁的液体在毛细管中是上升的。如果一种液体不润湿管壁, 如水银, 水银在毛细管中是下降

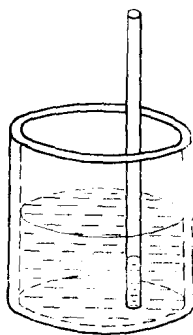
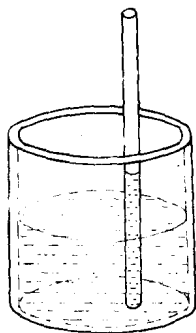


图 1-4 水在毛细管中上升的现象 图 1-5 水银在毛细管中下降的现象

的，见图 1-5。润湿管壁的液体在毛细管中上升和不润湿管壁的液体在毛细管中下降的现象就叫做毛细现象。

液体在毛细管中上升的高度，可用下式来计算：

$$h = \frac{2\sigma\cos\theta}{r\rho g}$$

式中 h ——液体在毛细管中上升的高度；

σ ——液体的表面张力系数；

θ ——液体对固体表面的接触角；

r ——毛细管的内半径；

ρ ——液体的密度；

g ——重力加速度。

由上式可知，液体在毛细管中上升的高度与表面张力系数和接触角余弦的乘积成正比，与毛细管的内径、液体的密度和重力加速度成反比。

可将零件表面的开口缺陷看作是毛细管或毛细缝隙，液体渗透剂也正是在毛细作用下自动地渗进表面缺陷中去的。值得指出的是，渗透剂渗入表面开口缺陷中去的力不是来源于渗透剂的重力，因为即使缺陷的开口朝下，渗透剂照样能渗进缺陷中去。

渗透检验时，在清洗掉零件表面多余的渗透剂后，缺陷中的渗透剂在附着力的作用下，能重新扩展回到清洁干净的表面上来，直到达到分布平衡，因此在不进行显象的情况下，缺陷处也能产生显示。显象剂的作用如同吸墨纸一样，是利用显象剂在缺陷处形成很多小的毛细管作用，将缺陷中的渗透剂吸附到零件表面上来，形成一个放大的缺陷显示。

第二节 紫外线和荧光

荧光渗透检验时，零件显象后，缺陷显示在白光下是看不见的，只有在紫外线照射下缺陷显示才发出明亮的荧光。

一、紫外线

紫外线是一种波长比可见紫光更短的不可见光。荧光检验所

用的紫外线波长在 3300~3900 埃^① 范围内，其中心波长约为 3650 埃。通常将这种略低于紫色可见光波长的紫外线称为黑光。严格地说，荧光检验所用的紫外灯应叫做黑光灯。

二、荧光

许多原来在白光下不发光的物质在紫外线照射下能够发光，这种被紫外线激发发光的现象，称为光致发光。光致发光的物质，在外界光源移去后，仍能持续发光的，称为磷光物质；在外界光源移开后，立即停止发光的，称为荧光物质。荧光渗透剂中含有荧光物质，当黑光照射到荧光渗透剂上时，荧光物质便吸收紫外线的能量，处于较低能级的离原子核较近的轨道上的电子受激发而跳跃到离原子核较远的轨道上去，使原子能量升高而处于激发状态。处在激发状态的原子很不稳定，其高能级上的电子要自发地跳跃到失去电子的较低能级上去，电子由高能级跳到低能级，将发出一个光子，这个光子的能量就等于高低能级的能量差。荧光渗透剂中的荧光染料吸收紫外线的能量发出的光子的波长在 5100~5500 埃范围内，为黄绿色荧光。

第三节 对比度和可见度

液体渗透检验最终能否检查出缺陷，依赖于缺陷显示能否被观察者看到。缺陷显示能否被观察到，用可见度来衡量。可见度又与显示的对比如有关。

一、对比度

一个显示和围绕这个显示的表面背景之间的亮度或颜色之差，称之为对比度。对比度可用这个显示和围绕这个显示的表面背景之间反射或发射光的相对量来表示，这个相对量称为对比率。

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为入射白光强度的 3%，这意味着黑白之间能得到最大的对比率为 33

① 1 埃 (Å) = 10^{-10} 米 (m)。

比 1。实际上要达到 33 比 1 是极不容易的。黑色染料显示与白色显象剂背景之间的对比率为 90% 比 10%，即 9 比 1，这已是最高的比率了。红色染料显示与白色显象剂背景之间的最高比率约为 6 比 1。

荧光显示与不发荧光的背景之间的对比率数值要比颜色对比率高得多，因为荧光和非荧光之间是发光的显示和暗的背景之比。即使周围环境不可避免有些微弱的白光存在，这个对比率数值仍可达 300 比 1，甚至达 1000 比 1，在完全暗的情况下，对比率可达无穷大。

二、可见度

可见度是观察者相对背景、外部光等条件能看到显示的一种特征。它与显示的颜色、背景的颜色、显示的对比度、显示本身反射或发射光的强度、周围环境光线的强弱及观察者的视力等因素有关。

人的眼睛具有复杂的观察机能，它能观察事物、区分发光强度和分辨各种不同的颜色等。人的眼睛在强的白光下对光强度的微小差别不敏感，而对颜色和对比度差别的辨别能力很强（见图 1-6）；但在暗光环境中，人的眼睛辨别颜色和颜色对比度的本领则很差，却能看见微光的物体或微弱的光源（见图 1-6）。当

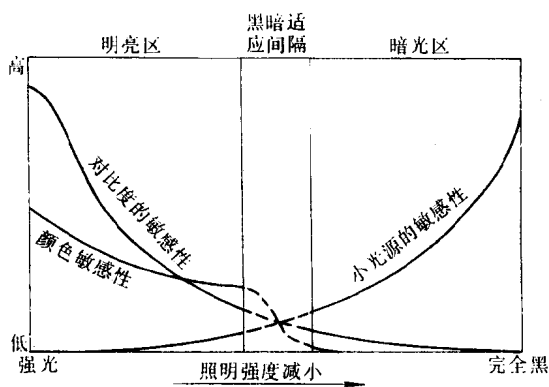


图 1-6 人眼睛敏感特性图