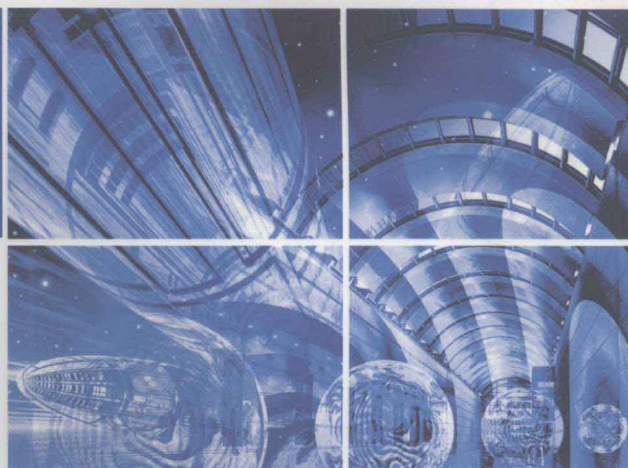


普通高等教育“十二五”规划教材



无损检测实验

唐继红 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书是根据高等教育对工科实验课教学的基本要求,吸取国内同类专业教材的优点,在总结多年实验教学经验的基础上编写而成的。

全书共9章,包括绪论、射线检测、超声检测、涡流检测、磁粉检测、微波检测、渗透检测、激光全息无损检测、综合设计性实验,共67个实验。本书在基本涵盖了无损检测五大常规方法实验的基础上,还包括了在实际工程应用中较多采用的激光检测实验及微波检测实验。本书体系完整,结构合理,充分反映了二十余年来无损检测专业实验课程教学改革的成果和发展趋势,注重实验内容的基础论证性、综合设计性、开放创新性。本书推荐学时为30~50学时。

本书可作为普通高等学校和高职高专学校无损检测专业学生的实验教学用书,也可作为在职无损检测技术人员培训考核的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

无损检测实验/唐继红主编. —北京:机械工业出版社,2011.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-33527-6

I. ①无… II. ①唐… III. ①无损检验—实验—高等学校—教材

IV. ①TG115.28—33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第028423号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:刘小慧 韩冰 冯铤

版式设计:张世琴 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:李妍

北京外文印刷厂印刷

2011年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.75印张·312千字

标准书号:ISBN 978-7-111-33527-6

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

无损检测是一门涉及多学科的工程实践性很强的综合性技术。通过专业课程学习，学生应在掌握基本理论的基础上，熟悉检测工艺和设备，了解检测标准及应用，学会工艺规范设计，并掌握基本的操作技能。

南昌航空大学无损检测专业是1984年经原国家教委批准在国内率先创办的本科专业。学校始终坚持以无损检测为特色，把测控技术与仪器专业（原无损检测专业）建设成为首批省级品牌专业和国家级特色专业。教师始终坚持把“培养具有扎实理论基础和较强工程实践能力的高级无损检测技术专业人才”作为专业的培养目标，并强化实践能力及培养解决工程技术问题能力，尤其重视专业实验技能的培养。

本书是在南昌航空大学无损检测教研室的教师多年来精心编写的各种检测技术实验指导书的基础上，经过多次修改而成的。

本书由唐继红任主编，李坚、余欣辉任副主编。其中，余欣辉编写了第2章，李坚编写了第3章，付跃文参与了第4章4.7、4.8节的编写工作，袁丽华参与了第8章的编写工作，其余章节内容由唐继红编写。本书的出版得到学校有关部门领导的大力支持和帮助。特别感谢一些长期在实验教学中工作过的高春法、唐瑞林、黄昌光、张维、余海根等老师对本书的贡献，在此一并致谢。

任吉林和张小海为本书主审，他们提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中难免有疏漏之处，在此恳请广大师生批评指正！

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 进行无损检测实验的必要性 1
- 1.2 科学实验教学的目标 2
- 1.3 教学内容与教学安排的整合与优化 2
- 1.4 无损检测实验的任务 2
- 1.5 无损检测实验的基本概况 3
- 1.6 无损检测实验报告的撰写 4

第 2 章 射线检测 6

- 2.1 X 射线胶片特性曲线的制作 6
- 2.2 X 射线管基本参数测定 10
- 2.3 X 射线机曝光曲线制作 15
- 2.4 规范对检测灵敏度 and 对比度的影响 20
- 2.5 射线照相相对缺陷深度和位置的测定 22
- 2.6 常规 X 射线照相与工业 CT 扫描的对比 26

第 3 章 超声检测 28

- 3.1 音频信号频谱分析 28
- 3.2 声级测量 31
- 3.3 声场光学演示法 33
- 3.4 超声仪器性能的测定 36
- 3.5 超声波探伤仪与直探头综合性能测定 42
- 3.6 超声波探伤仪与斜探头综合性能测定 45
- 3.7 组合双晶直探头性能参数测定 48
- 3.8 材质衰减系数的测定 50
- 3.9 不同表面粗糙度探测面透入声能损失值的测定 50
- 3.10 超声检测时的水平扫描线调整 52
- 3.11 超声纵波检测操作 53
- 3.12 钢板对接焊缝超声横波检测操作 57

第 4 章 涡流检测 63

- 4.1 相敏检波工作原理 63
- 4.2 阻抗图的制作 67
- 4.3 穿过式线圈中圆柱试件内部磁场测量 71

- 4.4 涡流检测影响因素的测量 73

- 4.5 涡流传感器的制作及平衡调节 75

- 4.6 电导率的测量 78

- 4.7 膜层厚度的测量 82

- 4.8 涡流探伤 85

- 4.9 多频涡流对干扰信号的抑制 88

- 4.10 涡流位移、振幅的测量 92

- 4.11 磁记忆检测技术实验 95

第 5 章 磁粉检测 98

- 5.1 磁粉检测综合性能测定 98

- 5.2 磁粉磁性及粒度的测定 100

- 5.3 磁悬液性能的测定 103

- 5.4 直流和交流磁粉检测灵敏度的比较 105

- 5.5 周向和纵向磁粉检测 107

- 5.6 螺线管磁场分布和有效磁化范围的测试 110

- 5.7 线圈开路磁化 L/D 值对退磁场影响的测试 112

- 5.8 钢板焊缝的磁粉检测 113

- 5.9 退磁及剩磁的测量 117

第 6 章 微波检测 120

- 6.1 电磁波反射和折射的研究 120

- 6.2 电压驻波比的测量一 123

- 6.3 电压驻波比的测量二 127

- 6.4 阻抗的测量及匹配技术 132

第 7 章 渗透检测 140

- 7.1 渗透液性能测定一——运动粘度的测定 140

- 7.2 渗透液性能测定二——闭口闪点的测定 144

- 7.3 渗透液性能测定三——相对密度的测定 147

- 7.4 渗透液性能测定四——腐蚀性能的测定 148

- 7.5 液体表面能力测定一——毛细管法 149

- 7.6 液体表面能力测定二——滴体积法 151

- 7.7 荧光亮度的测定 154

7.8 紫外灯强度的测定	156	8.4 光导纤维衰减系数的测定	177
7.9 荧光液含水量（体积分数）的 测定	158	8.5 光纤、光谱测试系统演示实验	180
7.10 渗透液的清洗性能实验	159	8.6 PSD 三角法测量	182
7.11 水洗型荧光渗透检测实验	160	8.7 激光全息干涉应力腐蚀裂纹扩展 CCD 监测系统演示实验	185
7.12 着色法渗透检测	163	第9章 综合设计性实验	188
7.13 乳化剂化学性能实验	165	9.1 压力容器无损检测	188
7.14 显像剂性能实验	166	9.2 T型角焊缝超声检测操作	192
7.15 着色渗透液的颜色强度实验	167	9.3 缺陷影像观察与等级评定	194
第8章 激光全息无损检测	169	参考文献	196
8.1 激光干涉测长实验	169	读者信息反馈表	
8.2 激光衍射测细丝直径及定位实验	171		
8.3 激光全息干涉无损检测	174		

第1章 绪 论

无损检测是应用物理、材料科学和电子技术等多门学科互相渗透和结合的一门综合性科学技术，是以不损坏被检测对象的使用性能为前提，应用多种物理原理和化学原理，对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检测和测试，借以评价它们的完整性、连续性、安全可靠性及某些物理性能的技术。

无损检测可以对工程材料、零部件和产品进行百分之百的检测，并根据所检测出缺陷的特性，依照常规力学或断裂力学的判据作出评价。所以，无损检测是为了保证材料和质量、性能以及安全可靠性的—种既经济又节约的重要测试技术，已经成为工业生产中实现质量控制、节约原材料、改进工艺和提高劳动生产率所不可缺少的重要技术手段之—。进入21世纪以来，随着现代科学技术的突飞猛进，试验手段和各种先进仪器设备的迅速发展，也进一步促进了无损检测技术的发展。

各种无损检测方法的基本原理几乎涉及现代物理学的各个分支。按照检测机理和检测信息处理方式的不同来分类，无损检测方法主要包括射线检测法（X射线、 γ 射线、中子射线、质子和电子射线等）、声和超声检测法（声振动、声撞击、超声脉冲反射、超声透射、超声共振、超声频谱、声发射和电磁超声等）、电学和电磁检测法（电阻法、电位法、涡流法、录磁与漏磁法、磁粉法、核磁共振法、微波法、巴克豪森效应和外激电子发射等）、力学和光学检测法（目测法、内窥镜法、荧光法、着色法、脆性涂层法、光弹性覆膜法、激光全息摄影干涉法、泄漏鉴定、应力测试等）、热力学检测法（热电动势法、液晶法、红外线热图等）以及化学分析检测法（电解检测法、激光检测法、离子散射法、俄歇电子分析法和穆斯堡尔谱图法等）等。

目前，在工业生产检验中，应用最广泛的无损检测方法主要有射线检测法、超声检测法、涡流检测法、磁粉检测法和渗透检测法，称为无损检测的五大常规方法。这些传统检测方法的技术成熟，可以有效地取代破坏性试验，在质量控制、工艺改进、提高生产率、安全保障、事故预防等方面发挥了重要作用。

现代科学技术的发展，必将进一步促进无损检测这一综合性学科的蓬勃发展。

1.1 进行无损检测实验的必要性

实验教学是高等工科院校教学与学科建设的关键环节之一，是知识与能力、理论与实践相结合的教学活动，也是学生全面掌握理论知识、培养科学思维、锻炼应用技能、孕育创新意识和历练坚强意志的重要环节。根据高等学校工科工程专业对学生的要求，无损检测专业对学生的工程素质、实践能力提出了更高更严格的要求。分析实验教学目标和专业教学要求，找出现行实验教学内容和人才培养方案中存在的问题，优化实验教学安排，构建目标定位准确的实验教学框架，是实验教学不可缺少的重要内容。

1.2 科学实验教学的目标

实验教学的目的是帮助学生了解实验教学的意义及其在专业人才培养计划中的地位,了解实验教学的规章制度,掌握常用设备的操作方法,熟悉实验过程,掌握数据处理和误差分析方法,培养良好的习惯和敬业精神。

不同项目的实验教学,一方面加强理论联系实际,另一方面培养学生的操作能力和解决问题的能力,促进学生发现问题、分析问题、解决问题的能力的基本素质的形成。在培养学生动手能力和创新能力的同时,引导他们养成科学求真的态度、严谨周密的作风和团结协作的精神。

在教学中,注重学生的理论知识学习,关注学生的人文素质提高;同时,锻炼学生的实践能力,培养学生的创新意识。

1.3 教学内容与教学安排的整合与优化

实验以课程为核心,实验学时分散在相应的课程总学时里。所有实验教学全部附设在相应的课程中。

在专业课实验教学中,学生的专业概念、专业素质和工程素养的形成恰恰依赖于专业基础课、专业限选课和专业任选课。通常,在第一阶段开设一些验证性实验,让学生进入实验室自己动手,得出实验结论;在第二阶段,学生通过实验预习准备和亲自动手,可以反复多次操作,直至能熟练掌握操作技能;在第三阶段,根据所学的知识,学生可以“创造性”地得出实验数据并完成实验报告。综合性实验、创新性实验在其他教学实践环节中难以得到体现。专业实验课教学可以充分反映学生自主完成的综合性实验、创新性实验成果。

1.4 无损检测实验的任务

无损检测实验课的任务是以掌握整体优化的知识结构为基础,着重培养学生的专业概念、专业素质和工程素养,锻炼学生的工程实践能力和创新素质。关键问题是整体方案的探索与形成。其具体工作包括:研究实验教学在无损检测专业人才培养及学生创新能力形成中的作用和地位,搭建科学的实验教学框架,制订特色鲜明的人才培养方案,构建创新的实验教学体系,保证实验教学发展。探索循序渐进、特色鲜明的实验教学框架体系,构建理论创新、实践突出、分工明确的实验教学管理制度。

无损检测实验课的目标是培养学生的创新精神和实践能力,倡导学生变被动接受式学习为主动探究式学习,培养学生的独立性和自主性,逐步形成适合自己的学习方法。

总体思想和目标确立之后,以本专业学生的动手能力和实践技能的基本要求为基础,分析从业要求与学校教学之间的联系和差距。然后,分析现行人才培养方案中实验教学内容及安排,立足培养学生的工程意识和可持续发展能力,整合教学部分,优化课时分配,探索结构合理、循序渐进、特色鲜明的实验教学框架,努力使教学目标与社会需求一致。

1.5 无损检测实验的基本概况

1. 实验的概念

实验是对已经学习过的专业知识进行重复、加深和运用的过程。用实践的形式来巩固知识、理解知识和综合运用知识,把在专业理论课中学习过的知识点,通过可以操作的实践过程,再现到实践之中。在无损检测实验中,超声检测、磁粉检测、涡流检测的实验过程有一定的相似性,而射线检测、渗透检测和激光全息无损检测的实验过程则有其不同点,其中射线检测实验要有特定的防护实验机房,防止射线侵袭损伤人体;渗透检测实验要有污水处理设施,防止有害物质进入人体;激光全息无损检测要有激光平台和暗室等,对实验条件有一定的特殊要求。

2. 实验的作用

1) 通过实践性教学,学生能够直接感受到专业的操作过程,并在知识的运用过程中深入理解专业理论和过程。

2) 学生通过感性认识接触实际问题,从而便于接受理论知识。

3) 学生通过知识的重复来加深对专业知识的理解。

4) 学生通过知识的综合与运用来体会专业知识的意义。

3. 实验室建设

实验室建设是投入比较大的项目,对专业教学意义重大。所以,必须在实验室建设中把握以下原则,才有可能使得实验室能够经得起时间和教学的考验。

(1) 实践性原则 无损检测是实践性很强的学科,许多理论和经验都仍需在实践中继续检验。所以,无论是从专业教学还是从理论检验和总结的需要出发,都需要重视实践性原则。即便是模拟的认知性教学,其内容和指导思想也必须源于实践,并对教学有意义。

(2) 全面性原则 以传授知识、训练方法、探索可能为目标的教学活动,应该比较全面地将现有无损检测五大常规实验形式作为教学内容展示给学生,使学生在全面了解已有实验的基础上进行思考和学习。所以,构建专业实验室,使之成为教学活动的有机组成部分,能更好地支持教学,达到教学目标。

运用专业知识在实验室中进行观察、了解、参与、实践、评价、总结等教学活动,学生可加深对专业技术知识应用的理解,并达到熟练掌握程度。

(3) 实验层次体系 以专业素质和工程素养的形成为出发点,将知识结构、专业技能和综合素质作为方案的总体功能;以工程为背景,以功能实现为目标,将专业基础课、专业限选课和专业任选课的实验教学和其他实践环节综合起来,构建实验教学模块和体系。

1) 基础论证型实验。此类实验可以达到的教学目标是:直接感受到学科相关的社会应用过程,直观理解学科相关原理和应用过程,帮助学生分析、理解学科相关知识并应用于社会实践中。

2) 应用操作型实验。此类实验着眼于知识和运用,将与专业有关的知识有意识地进行运用。此类实验是局部性的设计实验。

3) 创新设计型实验。实验教学是实现创新人才培养目标的重要教学环节,对于培养学生创新能力、实践能力和创新精神有着不可替代的作用。学生能够自主创建用于应用的实

验,能够设计各种类型的工艺流程卡,能够设计应用平台,能够通过实践提高适应社会的综合素质,能够培养在实践中发现问题、提炼问题、概括问题、解决问题的意识和能力。

4) 开放型实验。开放型实验突出开放和创新,把多个知识点高度融合于应用领域,使学生能够从不同角度、不同侧面寻求解决问题的方案。开放型实验教学把学生推到实验的主体位置。在开放型实验教学过程中,教师虽要作出具体的实验日程安排,但只向学生提出实验任务和要求,而对实验原理、步骤等都不予交代;学生需自己选定实验课题,选择仪器设备,制订实验步骤,处理和分析实验数据。这样,学生在实验教学过程中有了较大的空间,可以运用自己掌握的知识和技能充分地发挥自己的聪明才智,既提高了学习兴趣,同时又锻炼了独立思考问题、解决问题的能力。

1.6 无损检测实验报告的撰写

实验报告是在实验基础上撰写而成的。写实验报告时,要有实验过程的各种原始资料,以便从中筛选出可说明实验课题的论据。实验报告必须客观地反映实验的全过程,结论要根据实验材料的整理、实验数据的统计而得出,绝不允许学生根据个人好恶和需要,主观臆断妄下结论。实验报告的撰写应注意结构上的逻辑性、推理上的严密性和语言上的精炼准确性。没有实验,就无从谈起实验报告。对于综合设计性实验,其研究的问题比较深,实验花费时间长,所以价值比较大,因而其实验报告的要求相对较高。

实验报告的内容包括:实验题目、实验目的、实验日期和实验者、实验仪器和设备、实验方法和步骤、实验数据记录、实验结论和分析、实验结果评价和讨论、参考文献与附录。

1. 实验题目

实验题目包括本次实验的题目及内容。

2. 实验目的

简要说明实验课题的来源、背景、实验进展情况及实际意义,即本次实验所要达到的目标或目的是什么。

3. 实验日期和实验者

在实验名称下面注明实验日期和实验者名字。

4. 实验仪器和设备

写出主要的仪器和设备,应分类罗列,不能遗漏。此项内容可以促使学生去思考仪器的用法和用途,从而有助于理解实验的原理和特点。

5. 实验方法和步骤

根据具体的实验目的和原理来设计实验,写出主要的操作步骤,这是实验报告中比较重要的部分。此项内容可以使学生了解实验的全过程,明确每一步的目的,理解实验的设计原理,掌握实验的核心部分,培养科学的思维方法。在此项内容中还应写出实验的注意事项,以保证实验的顺利进行。

6. 实验数据记录

正确如实地记录实验现象或数据。为表述准确应使用专业术语,尽量避免口语的出现。这是实验报告的主体部分,在记录中,应要求学生即使得到的结果不理想,也不能随意修改,可以通过分析和讨论找出原因和解决的办法,养成实事求是和严谨的科学态度。数据要

严格核实，要注意图表的正确格式，要用统计检验来描述实验。

7. 实验结论和分析

对于所进行的操作和得到的相关现象，运用已知的知识去分析和解释，进而得出结论。这是实验联系理论的关键所在，有助于学生将感性认识上升到理性认识，进一步理解和掌握已知的理论知识。

8. 实验结果评价和讨论

这部分的主要内容是用实验效果来回答实验目的中提出的问题，对实验效果进行分析、评价。

以上1~7项是学生接受、认识和理解知识的过程；而此项内容则是回顾、反思、总结和拓展知识的过程，是实验的升华，应给予足够的重视。在此项中，学生可以在教师的引导下自由发挥，如“你对本次实验的结果是否满意？为什么？如果不满意，你认为是什么原因造成的？如何改进？”，或“为达到实验目的，实验的设计可以如何改进？这样改进的优点是什么？”，或“你认为本实验的关键是什么？”等问题。这些都是学生感兴趣的地方，既能反映他们掌握知识的情况，又能培养他们分析和解决问题的能力，更重要的是培养他们敢于思考、敢于创新的勇气和能力。因此，从培养学生思维能力的角度来说，此项内容应是实验报告的重点和难点。

9. 参考文献与附录

在实验报告中参考和引用别人的材料和论述时，应注明出处、作者、文献标题、书名或刊名、卷期、页码，出版社及日期等。参考文献与附录是很重要的实验资料，便于以后查找时进行核对。

第2章 射线检测

射线检测 (Radiographic Testing, RT) 是工业无损检测的一个重要专业门类, 主要应用于探测试件内部的宏观缺陷。当射线照射在被检工件上时, 会与物质发生相互作用, 在因吸收和散射而使其强度减弱后, 剩余的射线被记录在信息器材上, 经过适当的处理使之转化为可视信息以供检测判断。

当被透照物体的局部存在缺陷, 且构成缺陷的物质的衰减系数不同于物体本身时, 该缺陷区域的透过射线强度就会与周围的完好部位产生差异。这种差异在信息器材上被记录处理后, 相应部位就会出现黑度上的不同, 而这种不同被定义为对比度。根据对比度构成的不同形状的影子, 评片人员可以判断缺陷情况并评价物体质量。其原理如图 2-1 所示, 缺陷在射线透照方向上的尺寸为 ΔT , 对比度由射线强度 I_2 与 I_1 经过处理后得出。

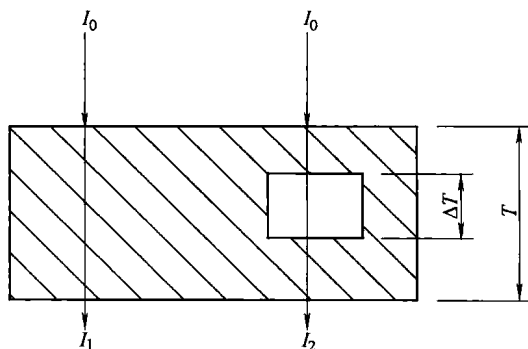


图 2-1 射线检测原理图

射线照相法在锅炉压力容器等的制造检验和在用设备检验中得到广泛的应用。其检

测对象是各种熔化焊接方法的对接接头, 也能检查铸钢件, 在特殊情况下也可用于检测角焊缝或其他一些特殊结构试件。它具有结果直观且便于长期保存的优点, 对于缺陷的性质、数量、尺寸及位置也能够进行比较准确的判断。

射线检测法几乎适用于所有材料, 尤其在金属材料上的使用能得到良好的效果; 不过射线照相法检测成本较高, 检测速度较慢, 同时射线对人体有较强的危害, 使用时应注意采取防护措施。

本教材选择了六个具有代表性的实验和一个综合性实验, 有助于对射线照相法形成一个系统的概念。

2.1 X 射线胶片特性曲线的制作

X 射线胶片是目前射线探伤最常用的一种信息记录器材。与一般的感光胶片不同, X 射线胶片在片基的两面均涂有感光乳剂层, 这样得以提高它的感光速度。X 射线胶片由片基、结合层、感光乳剂层和保护层组成。了解它的感光特性有助于射线照相时选择恰当的透照参数, 从而便于判断被检物体的真实情况, 减少误判的可能。

【实验目的】

- 1) 掌握 X 射线胶片特性分析的基本方法。
- 2) 作出柯达 AA400 和国产天津—Ⅲ型胶片的特性曲线。

【实验设备与器材】

- 1) 一块 1mm 厚的黄铜板作为滤波板，并紧贴于射线管套窗口。
- 2) 数显黑度计一台，精度为 $\pm 0.02D$ 。
- 3) 自动曝光器或秒表一支。
- 4) 100mm × 250mm × 5mm 铅板一块，按图 2-2 所示加工成铅光栏。
- 5) 直径 $\phi 40$ mm、厚 5mm 的铅盖十块。
- 6) X 射线机一台。

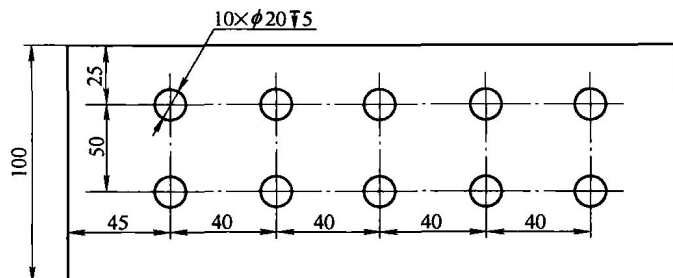


图 2-2 铅光栏示意图

【实验原理】

1) X 射线胶片是探测 X 射线的存在、分析 X 射线强度的最原始最基本的工具。分析和了解胶片的特性是正确使用胶片的必要前提，对胶片特性的了解是通过胶片特性曲线的制作与分析来实现的。

2) 胶片经 X 射线照射后，感光乳剂发生光化学作用，经显影、定影等暗室处理后，底片产生一定的黑度，即光学密度，记为 D 。 D 可表达为

$$D = \lg \frac{1}{T} \quad (2-1)$$

式中， T 为透射率，即一束强度为 L_0 的光量通过底片后，光量减少至 L 时的比值，可表示为

$$T = \frac{L}{L_0} \quad (2-2)$$

由此，式 (2-1) 可写为

$$D = \lg \frac{L_0}{L} \quad (2-3)$$

本实验中底片 D 的数值可通过数显黑度计测量而得。

3) 黑度 D 是 X 射线强度 I 、波长 λ 、曝光时间 t 及显影因素 γ 等的函数。即

$$D = f(I, \lambda, t, \gamma) \quad (2-4)$$

当波长与显影因素一定时， D 是 I 、 t 的函数。即

$$D = KItP \quad (2-5)$$

当 D 值不太大时， $P = 0.98 \sim 1$ ，故式 (2-5) 可近似为

$$D = KIt \quad (2-6)$$

式中， K 为比例常数； I 是射线强度。

因为射线强度与管电流 i 成正比，所以

$$D = K'it = K'E$$

(2-7)

这里 $E = it$ 是 X 射线机的近似曝光量。

4) 黑度 D 与近似曝光量 E 之间的关系实际是相当复杂的，式 (2-7) 所表达的线性关系只是在特殊部分的近似表示。F. Hunter 和 V. C. Driffield 经过对胶片特性的深入研究，提出了用实验曲线表示胶片特性的理论，并对曲线的各部分（即胶片的各种特性）作了原则性阐述。他们提出的特性曲线称为 H - D 曲线，此曲线表达比公式表达更确切。

H - D 曲线的纵坐标为 D ，横坐标为曝光量的对数（或相对曝光量的对数） $\lg H$ 。

【实验方法与步骤】

1. 手动曝光实验

将带有圆孔的铅光栏、胶片和底衬铅板按图 2-3 所示的方式放好，并按表 2-1 中的数据依次拿去孔盖，逐一曝光。时间用秒表控制，要精确掌握时间，以减少测量误差。

曝光条件：100kV，5mA，焦距 1m，滤波采用 1mm 厚的黄铜板。

2. 自动曝光实验

1) 将包装好的胶片固定在自动曝光器上，将自动曝光时间间隔设定为 5s。

2) 在 100kV、5mA、焦距 1m 和 1mm 厚的黄铜板滤波的条件下打开自动曝光器开关，间隔 5s 自动曝光 14

次，停机后更换一次胶片，并用 10s 间隔再曝光 14 次。这两张胶片的曝光参数见表 2-2。

手动曝光实验和自动曝光实验只需选做其中一项。

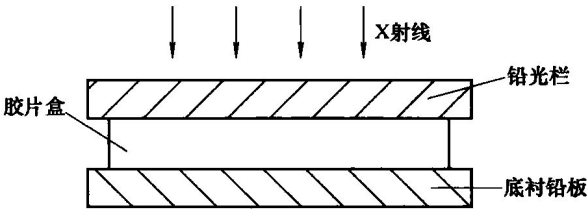


图 2-3 手动曝光

表 2-1 手动曝光实验

序 号	曝光时间 t/s	曝光量 $H/\text{mA} \cdot \text{s}$	曝光量对数 $\lg H$	底片净黑度 D
1	4			
2	8			
3	16			
4	24			
5	32			
6	64			
7	96			
8	128			
9	160			
10	192			

表 2-2 自动曝光实验

	曝光时间 t/s	曝光量 $H/mA \cdot s$	曝光量对数 ($\lg H$)	底片净黑度 D
第一张胶片	5			
	10			
	15			
	20			
	25			
	30			
	35			
	40			
	45			
	50			
	55			
	60			
	65			
	70			
第二张胶片	70			
	80			
	90			
	100			
	110			
	120			
	130			
	140			
	150			
	160			
	170			
	180			
	190			
	200			

3. 暗室处理

切曝光胶片时，在同一张胶片上切下一小块作为不参与曝光的胶片，其与曝光后的底片同时进行暗室处理。

1) 显影。采用胶片说明书推荐的显影配方，采用新液，显影温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，显影过程中应不断搅动，显影时间按配方要求。

2) 停影。显影之后，胶片应立即浸入停影液中浸泡 30 ~ 60s，温度条件和步骤与配方要求相同。

3) 定影。停影后的胶片应立即浸入胶片说明书中推荐的定影液中，温度为 20°C 左右，

定影时间为 15min，定影开始时要不断搅动。

4) 水洗。胶片定影后在 20℃ 流水中冲洗 30min 以上。

5) 晾干。用烘烤箱将冲洗后的胶片烘干或自然晾干。

4. 底片黑度测定

1) 按黑度计说明书的标准操作，进行底片黑度测定。分别测量曝光底片和未曝光底片的黑度为 D_1 和 D_2 ，则底片的净黑度 D 为

$$D = D_1 - D_2 \quad (2-8)$$

其中， D_2 包含了片基黑度和感光乳剂膜的灰雾黑度。

2) 净黑度也可按以下方法测量：以未曝光的底片来校准黑度计的零点，此时测出的曝光底片的黑度即为净黑度 D 。

3) 将测得的 D 值分别填入表 2-1 和表 2-2 中。

5. 绘制胶片特性曲线

在坐标纸上以净黑度 D 值为纵坐标，相应的曝光量对数 $\lg H$ 为横坐标，用表 2-1 和表 2-2 中的数据在坐标纸上标出相应的点，并连成曲线，即为所测胶片的特性曲线。

【实验数据分析与处理】

1) 按所求得曲线，计算出该胶片正常曝光范围内的对比度和感光度。

2) 讨论特性曲线各段所代表的含义。

【实验报告要求】

1) 简述胶片的感光特性和特性曲线制作原理。

2) 分析黄铜滤波板的作用。

3) 列出实验和计算的数据、图表，并作简要分析。

4) 实验体会（认识、疑问、新的见解等）。

【实验思考题】

1. 在胶片特性曲线中，两个连接特定黑度的点形成一条直线，此直线的斜率是什么？

2. 宽容度不同的两种 X 射线胶片，在正常曝光区透照同一带缺陷工件，哪种较为适用？

3. 银盐粒度对胶片的感光速度有什么影响？

4. 在曝光时，为什么将 X 射线胶片夹于两铅箔之间能增加底片的黑度？

5. 在已经曝光的 X 射线胶片中，若已被显影的银粒分布不均匀会造成什么影响？

2.2 X 射线管基本参数测定

X 射线机是进行 X 射线检测的必备仪器，而 X 射线管又是 X 射线机中最重要的部件。对于 X 射线管基本参数的了解和掌握，能够避免检测人员出现不必要的错误操作，提高检测效率。

【实验目的】

- 1) 掌握 X 射线管基本参数的测量方法。
- 2) 测出 X 射线管焦点的形状和大小、焦点至管套窗口距离及射线束辐射角、曝光场内射线强度分布规律。

【实验设备与器材】

- 1) X 射线机一台。
 - 2) 针孔板，有钨合金或铝板两种。
- 钨合金针孔板按图 2-4 及表 2-3 要求加工。

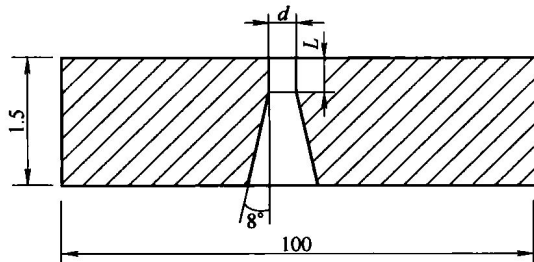


图 2-4 针孔板剖面示意图

表 2-3 钨合金针孔板加工要求

焦点公称尺寸 F/mm	针孔直径 d/mm		孔深 L/mm	放大倍数 L_2/L_1	L_1 /mm
	公称值	公差			
$0.3 \leq F < 1.2$	0.030	± 0.005	0.075 ± 0.01	3	≥ 100
$1.2 \leq F \leq 2.5$	0.075	± 0.005	0.35 ± 0.1	2	≥ 100
$2.5 < F$	0.100	± 0.005	0.50 ± 0.1	1	≥ 100

- 3) 内径约为 150mm 的薄壁钢管两根。
- 4) 1mm 厚的黄铜滤波板一块。
- 5) 金属直尺、绘图仪器及 X 射线胶片等。

【实验原理】

1. 焦点至管套窗口距离及射线束辐射角的测量原理

图 2-5 是有效焦点与辐射角形成的示意图。如果在窗口下，与射线束垂直且距离窗口为 L_2 和 $L_1 + L_2$ 的两个平面上放两张射线胶片，那么曝光后在胶片上将产生直径不同的两个圆。在与胶片平面垂直且过圆心的平面上将产生图 2-5 中的投影。显然 X 射线在两张底片上的曝光场直径分别为 D_1 和 D_2 ，若有效焦点的尺寸是已知的，其值

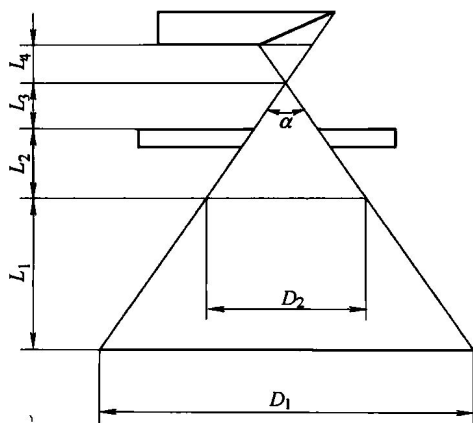


图 2-5 焦点与辐射角

为 d , 则有

$$L = L_3 + L_4 = \frac{L_1(D_2 + d)}{D_1 - D_2} - L_2 \quad (2-9)$$

$$\alpha = 2 \arctan \frac{D_1 - D_2}{2L_1} \quad (2-10)$$

式中, L 是焦点至套管窗口的距离; α 是射线束的辐射角。

L_1 、 L_2 、 D_1 、 D_2 可分别由测量得到, d 可从说明书中查得。

2. 焦点形状和尺寸的测定原理

阴极灯丝发射的电子在电场作用下射向阳极靶而激发 X 射线, 因此, 阳极靶面上焦点位置是一个射线源, 或者说相当于一个光源。根据光学原理, 任何一个光源都可以通过小孔成像。因此, X 射线管焦点的形状和尺寸也可以通过小孔成像求得。图 2-6 是焦点测定原理图。针孔板按图 2-4 和表 2-3 的要求制作。图 2-7 是焦点尺寸计算的几何关系图。 L_1 为焦点至窗口的距离, L_2 为窗口至胶片的距离, L_3 是为计算方便而引入的参量, F_0 为胶片上成像尺寸, F 则为焦点尺寸。根据相似三角形原理, 分别有

$$\begin{aligned} \frac{F_0}{d} &= \frac{L_3}{L_3 - L_2} \\ L_3 &= \frac{F_0 L_2}{F_0 - d} \end{aligned} \quad (2-11)$$

$$\frac{F_0}{L_3} = \frac{F}{L_1 + L_2 - L_3}$$

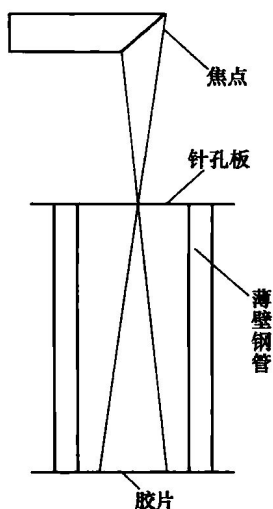


图 2-6 焦点测定原理图

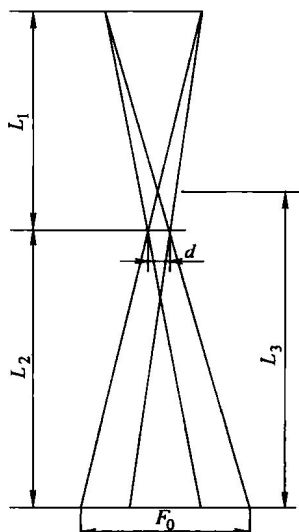


图 2-7 焦点尺寸计算几何关系图

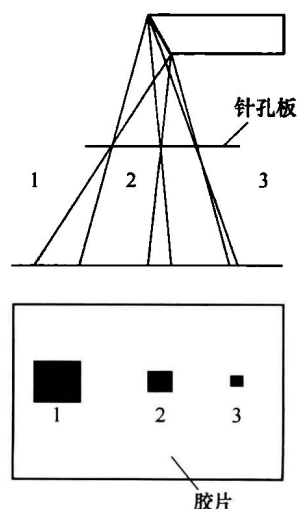


图 2-8 有效焦点

将 L_3 带入, 经简化可得

$$F = \frac{L_1}{L_2} F_0 - \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) d \quad (2-12)$$

胶片上形成的焦点影像与针孔板和针孔的位置有很大关系。如图 2-8 所示, 假定针孔的直径很小, 则在计算中可忽略不计, 那么式 (2-12) 便可改写为