

中国航空工业集团公司/中国航空发动机集团有限公司
检测及焊接人员资格鉴定与认证系列培训教材

航空无损检测概论

王自明 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

中国航空工业集团公司/中国航空发动机集团有限公司
检测及焊接人员资格鉴定与认证系列培训教材

航空无损检测概论

王自明 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书概述航空无损检测的对象、作用与特点;介绍航空无损检测技术应用所需的航空材料、航空产品制作工艺及航空制品缺陷的基本知识;介绍航空工业领域普遍应用的无损检测方法的物理基础、设备器材、检测技术及其航空应用,描述其他无损检测方法的基本原理、适用性与局限性,说明无损检测方法的选用原则和典型航空制件无损检测技术;讨论航空无损检测的质量控制要求。书末提供的六个附录,供有需要的读者阅读和使用。

本书定位为航空无损检测3级(高级)人员资格鉴定与认证考试的综合知识培训教材,也可供从事设计、制造、维修、检测的工程技术人员和生产管理人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

航空无损检测概论/王自明编著. —北京:国防工业出版社,2019.7

ISBN 978-7-118-11919-0

I. ①航… II. ①王… III. ①航空工业—无损检验—概论 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第122134号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 30 字数 683 千字

2019年7月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价68.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序 言

三千多年前的汉莫拉比法典,就提出了对制造有缺陷产品的工匠给予严厉的处罚,当然,在今天的以人为本的文明世界看来是不能予以实施的。即使在当时,汉莫拉比法典在总体上并没有得到真正有效地实施,其主要原因在于没有理化检测及评定的技术和方法来评价产品的质量以及责任的归属。从公元前 2025 年到世界工业革命前,对产品质量问题处罚的重要特征是以产品质量造成的后果和负责人为对象的,而对产品制造过程和产品质量的辨识只能靠零星、分散、宏观的经验世代相传。由于理化检测和评估技术的极度落后,汉莫拉比法典并没有解决如何判别造成质量问题和失效的具体原因的问题。

近代工业革命给人类带来了巨大物质文明,也不可避免地给人类带来了前所未有的灾难。约在 160 多年前,人们首先遇到了越来越多的蒸汽锅炉爆炸事件,在分析这些失效事故的经验教训中,英国于 1862 年建立了世界上第一个蒸汽锅炉监察局,把理化检测和失效分析作为仲裁事故的法律手段和提高产品质量的技术手段。随后在工业化国家中,对产品进行检测和分析的机构相继出现。材料和结构的检测开始受到重视则是近半个世纪的事情。第二次世界大战及后来的大量事故与故障,推动了力学、无损、物理、化学和失效分析的快速发展,如断裂力学、损伤力学等新兴学科的诞生以及扫描电镜、透射电镜、无损检测、化学分析等大量的先进分析设备等的应用。

勿容置疑,产品的质量可靠性要从设计入手。但就设计而言,损伤容限设计思想的实施就需要由无损检测和设计用力学性能作为保证,产品从设计开始就应考虑结构和产品的可检性,需要大量的材料性能数据作为设计输入的重要依据。

就材料的研制而言,首先要检测材料的化学成分和微观组织是否符合材料的设计要求,性能是否达到最初的基本设想,而化学成分、组织结构与性能之间的协调关系更是研制高性能材料的基础,对于材料中可能存在的缺陷更需要无损检测的识别并通过力学损伤的研究提供判别标准。

就构件制造而言,一个复杂或大型结构需要通过焊接来实现,要求在结构设计时就对材料可焊性和工艺可实施性进行评估,使选材具有可焊性、焊接结构具有可实施性、焊接接头缺陷具有可检测性,焊接操作者具有相应的技能水平,这样才能获得性能可靠的构件。

检测和焊接技术在材料的工程应用中的作用更加重要。失效分析作为服役行为和对材料研制的反馈作用已被广泛认识,材料成熟度中也已经考虑了材料失效模式是否明确;完善的力学性能是损伤容限设计的基础,材料的可焊性、无损检测和失效模式不仅是损伤容限设计的保证,也是产品安全和可靠使用的保证。因此,理化检测作为对材料的物理化学特性进行测量和表征的科学,焊接作为构件制造的重要方法,在现代军工产品

质量控制中具有非常重要的地位和作用,是武器装备发展的重要基础技术。理化检测和焊接技术涉及的范围极其广泛,理论性与实践性并重,在军工产品制造和质量控制中发挥着越来越重要的作用。近年来,随着国防工业的快速发展,材料和产品的复杂程度日益提高,对产品安全性的保证要求越来越严格;同时,理化检测和焊接新技术日新月异,先进的检测和焊接设备大量应用,对理化检测和焊接从业人员的知识、技能水平和实践经验都提出了更高的要求。

为提高理化检测及焊接人员的技术水平,加强理化实验室的科学管理和航空产品及科研质量控制,中国航空工业集团公司、中国航空发动机集团有限公司成立了“中国航空工业集团公司/中国航空发动机集团有限公司检测及焊接人员资格认证管理中心”,下设物理冶金、分析化学、材料力学性能、非金属材料性能、无损检测、失效分析和焊工七个专业人员资格鉴定委员会,负责组织理化检测和焊接人员的专业培训、考核与资格证的发放工作。为指导培训和考核工作的开展,中国航空工业集团公司/中国航空发动机集团有限公司检测及焊接人员资格认证管理中心组织有关专家编写了检测及焊接人员资格鉴定与认证系列培训教材。

这套教材由长期从事该项工作的专家结合航空工业领域的理化检测和焊接技术的需求和特点精心编写而成,包括了上述七个专业的培训内容。教材全面、系统地体现了航空工业对各级理化检测和焊接人员的要求,力求重点突出,强调实用性而又注意保持教材的系统性。

这套教材的编写得到了行业内多家单位的支持和协助,在此一并表示感谢。

中国航空工业集团公司/中国航空发动机集团有限公司
检测及焊接人员资格认证管理中心

前 言

基于航空无损检测 3 级(高级)人员资格鉴定与认证对航空无损检测综合知识的要求,本书内容限定为航空无损检测技术和航空产品技术的基本知识,定名“航空无损检测概论”。

全书除绪论外,设四篇二十四章和六个附录。

绪论部分概述无损检测的定义与内涵、工作流程、基本要求,及航空工业领域研究与应用的无损检测方法。

第一篇航空无损检测的对象、作用与特点分为三章:第一章介绍航空无损检测的主要对象——飞机和直升机——的组成与功能,飞机制件的结构、材料及工艺特点;第二章说明无损检测在航空产品全过程质量控制中的地位和作用;第三章讨论航空工业领域的无损检测特点。

第二篇航空无损检测应用所需的航空产品技术知识分为十二章:第四章概述航空无损检测应用所需航空产品技术知识涉及的内容与范围;第五章介绍主要航空金属结构材料——结构钢与不锈钢、高温合金、铝合金、钛合金、镁合金——的特点、分类,及其在航空工业领域中的典型应用;第六章至第十五章介绍航空金属产品制造涉及的基本工艺——铸造、锻造、轧制,粉末冶金,热处理、机械加工/特种加工、表面防护,焊接、胶接,及先进聚合物基复合材料的成型与胶接——的基本知识,说明无损检测常见的金属铸件、锻件、轧制产品、粉末冶金制品、焊接接头、胶接接头和复合材料制品缺陷及航空制件服役缺陷。

第三篇航空材料与制件无损检测技术分为七章:第十六章至第二十章介绍五大常规无损检测方法——涡流检测、液体渗透检测、磁粉检测、射线照相检测、超声检测——的物理基础、设备器材、检测技术,及其在航空制造工程中的应用;第二十一章描述声发射检测、计算机层析成像检测、激光全息干涉检测、错位散斑干涉检测、红外热像检测等其他无损检测方法的基本原理、适用性与局限性;第二十二章讨论无损检测方法的选用原则及典型航空制件的无损检测技术。

第四篇航空无损检测的质量控制分为两章:第二十三章简述无损检测质量控制相关知识;第二十四章讨论航空无损检测质量控制要求。

附录 A 金属材料基础知识;附录 B 典型缺陷主要特征、冶金分析与检测方法;附录 C 部分无损检测标准样品的名称、规格及用途;附录 D 部分无损检测标准目录;附录 E 部分无损检测工艺卡典型格式;附录 F 部分无损检测信息资源,供有需要的读者阅读与使用。

本书定位为航空所有无损检测方法 3 级(高级)人员的综合知识培训教材。

本书在编写过程中,参考了大量公开出版的专著、标准、培训教材等资料,本人对有关作者表示衷心感谢。此外,教材也写入了作者多年从事无损检测工作积累的经验和在

培训教学中的一些体会。

史亦韦、张引依次对第二十三、第二十四章有重要贡献;吕健、石剑、李秀芬和任学冬、程黎明、王蝉、梁菁依次审阅了第一章、第十六章~第二十章,史亦韦审阅了全书,并提出宝贵意见和建议;本教材试用过程中,许多教师和学员提出了有益的意见;中国航发北京航空材料研究院提供了资料支持。作者对所有热情关心、支持和指导本教材编写的领导、专家和朋友们表示衷心感谢!

限于作者水平,加之编写航空无损检测综合知识(高级人员)培训教材是初次尝试,疏漏恐在所难免,热忱欢迎培训教师、培训学员、读者提出宝贵意见。

作者

2018年8月19日

目 录

绪论	1
0.1 无损检测的定义与内涵	1
0.2 无损检测的历史回顾	2
0.3 无损检测的工作流程	3
0.4 航空无损检测的基本要求	5
0.5 航空工业领域研究与应用的无损检测方法	6
复习思考题	6

第一篇 航空无损检测的对象、作用与特点

第一章 航空无损检测的主要对象	11
1.1 概述	11
1.2 飞机与直升机的组成与功能	12
1.3 飞机制件结构特点	15
1.4 飞机结构材料特点	17
1.5 飞机零件制造工艺特点	19
复习思考题	20

第二章 无损检测在航空产品全过程质量控制中的作用	21
2.1 概述	21
2.2 设计阶段	22
2.3 制造阶段	23
2.4 使用阶段	23
复习思考题	24

第三章 航空工业领域的无损检测特点	25
复习思考题	27

第二篇 航空无损检测应用所需的航空产品技术知识

第四章 概述	31
4.1 航空材料	31

4.2	航空产品制造工艺	32
4.3	航空制品缺陷	33
	复习思考题	34
第五章	航空金属材料	36
5.1	概述	36
5.2	钢	37
5.2.1	非合金钢	37
5.2.2	低合金钢和合金钢	38
5.2.3	钢在航空工业领域中的应用	38
5.3	高温合金	39
5.3.1	铁基、镍基和钴基高温合金	40
5.3.2	变形、铸造、粉末冶金和发散冷却高温合金	41
5.3.3	固溶强化、时效强化和氧化物弥散强化高温合金	41
5.3.4	高温合金制备特点	42
5.3.5	高温合金在航空工业领域中的应用	42
5.4	铝及铝合金	43
5.4.1	变形铝合金	43
5.4.2	铸造铝合金	44
5.4.3	铝合金在航空工业领域中的应用	45
5.5	钛及钛合金	45
5.5.1	α 型、 $\alpha+\beta$ 型和 β 型钛合金	46
5.5.2	变形钛合金和铸造钛合金	46
5.5.3	钛合金制备特点	47
5.5.4	钛合金在航空工业领域中的应用	49
5.6	镁及镁合金	49
5.6.1	变形镁合金	49
5.6.2	铸造镁合金	50
5.6.3	镁合金在航空工业领域中的应用	50
	复习思考题	50
第六章	金属铸造与铸件缺陷	53
6.1	概述	53
6.2	铸造方法	53
6.2.1	砂型铸造	53
6.2.2	特种铸造	54
6.3	金属铸件缺陷	56
6.3.1	铸件缺陷分类	56

6.3.2 无损检测常见的主要铸件缺陷	56
复习思考题	64
第七章 金属塑性加工与塑性加工制品缺陷	65
7.1 概述	65
7.2 锻造	67
7.2.1 锻造方法	67
7.2.2 锻件分类	68
7.2.3 锻件缺陷	69
7.3 轧制	72
7.3.1 轧制方法	72
7.3.2 轧制产品分类	72
7.3.3 轧制产品缺陷	72
7.4 其他塑性加工方法	77
7.4.1 挤压	77
7.4.2 拉拔	78
7.4.3 冲压	79
7.4.4 冷弯	80
7.4.5 旋压	80
7.4.6 高能率加工	80
复习思考题	80
第八章 粉末冶金与粉末冶金制品缺陷	82
8.1 概述	82
8.2 粉末冶金工艺	82
8.2.1 粉末制取	82
8.2.2 粉末成形	83
8.2.3 粉末烧结	83
8.3 粉末冶金制品缺陷	85
复习思考题	86
第九章 金属热处理与热处理工艺缺陷	87
9.1 概述	87
9.2 钢的热处理	87
9.2.1 退火	87
9.2.2 正火	87
9.2.3 淬火与固溶处理	88
9.2.4 回火和时效处理	88
9.2.5 冷处理	88

9.3	高温合金热处理	88
9.4	铝合金热处理	89
9.5	钛合金热处理	89
9.6	金属热处理工艺缺陷	89
	复习思考题	90
第十章 金属机加工/特种加工与加工工艺缺陷		91
10.1	机械加工	91
10.1.1	车削	91
10.1.2	铣削	92
10.1.3	刨削	93
10.1.4	磨削	93
10.2	特种加工	95
10.3	机械加工/特种加工工艺缺陷	95
	复习思考题	96
第十一章 金属表面防护与表面防护工艺缺陷		97
11.1	概述	97
11.2	表面处理	97
11.3	表面改性	97
11.4	表面镀涂	97
	复习思考题	98
第十二章 金属焊接与焊接接头缺陷		99
12.1	概述	99
12.2	熔焊	99
12.2.1	熔焊方法	99
12.2.2	熔焊接头	103
12.2.3	熔焊接头缺陷	105
12.3	压焊	112
12.3.1	压焊方法	112
12.3.2	压焊接头	115
12.3.3	压焊接头缺陷	115
12.4	钎焊	116
12.5	飞机典型焊接结构	117
12.5.1	飞机机体典型焊接结构	118
12.5.2	航空发动机典型焊接结构	118
	复习思考题	119

第十三章 金属结构件胶接与胶接结构缺陷	121
13.1 概述	121
13.2 蜂窝胶接结构制造	123
13.3 钣金胶接结构制造	128
13.4 金属胶接结构缺陷	131
复习思考题	133
第十四章 先进聚合物基复合材料制件的制作工艺与复合材料制件缺陷	134
14.1 概述	134
14.2 先进聚合物基复合材料制件的成形	137
14.2.1 预浸料制备	137
14.2.2 热压罐层压法	138
14.2.3 缠绕法	138
14.2.4 树脂传递模塑成形法	138
14.3 先进聚合物基复合材料制件的胶接	139
14.3.1 胶接内容	139
14.3.2 胶接接头	140
14.3.3 胶接材料	142
14.3.4 胶接工艺	143
14.3.5 典型结构件胶接	143
14.4 先进聚合物基复合材料制件缺陷	145
14.4.1 聚合物基复合材料制件的成形工艺缺陷	145
14.4.2 聚合物基复合材料制件的胶接缺陷	147
复习思考题	148
第十五章 航空制件服役缺陷	149
15.1 金属制件服役缺陷	149
15.2 聚合物基复合材料制件服役缺陷	150
复习思考题	154

第三篇 航空材料与制件无损检测技术

第十六章 涡流检测	157
16.1 概述	157
16.1.1 涡流检测的定义与内涵	157
16.1.2 涡流检测的历史回顾	157
16.1.3 涡流检测的适用性	158

16.1.4	涡流检测的优点与局限性	158
16.2	物理基础	158
16.2.1	电导率与磁导率	158
16.2.2	电磁感应、涡流及其趋肤效应	159
16.2.3	检测线圈的阻抗分析	161
16.2.4	有效磁导率、特征频率和相似率	164
16.2.5	涡流检测的基本原理	166
16.3	设备器材	168
16.3.1	检测线圈	168
16.3.2	检测仪器	170
16.3.3	辅助装置	172
16.3.4	标准样品	173
16.4	检测技术	174
16.4.1	缺陷检测	174
16.4.2	材质检验	177
16.4.3	膜层厚度测量	177
16.5	航空制造工程中的应用	178
	复习思考题	179
第十七章	液体渗透检测	183
17.1	概述	183
17.1.1	液体渗透检测的定义与内涵	183
17.1.2	液体渗透检测的历史回顾	183
17.1.3	渗透检测的适用性	184
17.1.4	渗透检测的优点与局限性	184
17.2	物理基础	184
17.2.1	毛细管作用	184
17.2.2	乳化现象与乳化剂	185
17.2.3	光致发光	185
17.2.4	可见度与对比度	186
17.2.5	渗透检测的基本原理	186
17.3	设备器材	187
17.3.1	检测设备	187
17.3.2	渗透剂、去除剂和显像剂	187
17.3.3	光学器材	190
17.3.4	标准样品	190
17.4	检测技术	191
17.4.1	检测方法	191
17.4.2	检测时机	193

17.4.3	渗透显示特征	193
17.4.4	渗透检测步骤	196
17.5	航空制造工程中的应用	203
	复习思考题	204
第十八章	磁粉检测	206
18.1	概述	206
18.1.1	磁粉检测的定义与内涵	206
18.1.2	磁粉检测的历史回顾	206
18.1.3	磁粉检测的适用性	207
18.1.4	磁粉检测的优点与局限性	207
18.2	物理基础	207
18.2.1	磁场及其特征量	207
18.2.2	铁磁性材料的磁特性	209
18.2.3	通电导体的磁场	211
18.2.4	退磁场与漏磁场	212
18.2.5	磁粉检测的基本原理	213
18.3	设备器材	214
18.3.1	磁粉探伤机	214
18.3.2	磁粉与磁悬液	214
18.3.3	测量仪器	215
18.3.4	标准样品	215
18.4	检测技术	217
18.4.1	检测方法	218
18.4.2	磁化方法	219
18.4.3	磁化电流和磁化规范	221
18.4.4	磁痕特征	223
18.4.5	磁粉检测步骤	226
18.5	航空制造工程中的应用	229
	复习思考题	230
第十九章	射线照相检测	232
19.1	概述	232
19.1.1	射线照相检测的定义与内涵	232
19.1.2	射线照相检测的历史回顾	233
19.1.3	射线照相检测的适用性	234
19.1.4	射线照相检测的优点与局限性	234
19.2	物理基础	235
19.2.1	射线的种类	235

19.2.2	射线的性质	236
19.2.3	射线的获得	236
19.2.4	射线穿过物质时的衰减	239
19.2.5	射线照相灵敏度	243
19.2.6	射线照相检测的基本原理	245
19.3	设备器材	246
19.3.1	射线探伤机	246
19.3.2	记录介质	251
19.3.3	像质计	253
19.3.4	增感屏	254
19.4	检测技术	257
19.4.1	透照方法	257
19.4.2	透照参数	260
19.4.3	评片技术	265
19.4.4	实时射线照相检测技术	271
19.4.5	其他射线照相检测技术	275
19.4.6	辐射防护	278
19.5	航空制造工程中的应用	278
	复习思考题	279
第二十章 超声检测		282
20.1	概述	282
20.1.1	超声检测的定义与内涵	282
20.1.2	超声检测的历史回顾	283
20.1.3	超声检测的适用性	283
20.1.4	超声检测的优点与局限性	283
20.2	物理基础	284
20.2.1	超声波及其分类	284
20.2.2	超声波的叠加、干涉、散射和衍射	287
20.2.3	超声波的声压、声强和声特性阻抗	289
20.2.4	超声波在异质界面上的透射、反射和折射	292
20.2.5	超声波在传播过程中的衰减	294
20.2.6	超声检测的信号显示	295
20.2.7	超声检测的基本原理	298
20.3	设备器材	299
20.3.1	超声检测仪	299
20.3.2	探头	301
20.3.3	超声自动检测系统	304
20.3.4	标准样品	305

20.4	检测技术	307
20.4.1	检测方法的选择	307
20.4.2	声束入射方向和检测面的确定	309
20.4.3	仪器和探头的选择	310
20.4.4	检测仪器的调整	311
20.4.5	扫查	311
20.4.6	检测结果的评定	311
20.4.7	相控阵超声检测技术	313
20.4.8	典型工件检测特点	315
20.5	航空制造工程中的应用	319
	复习思考题	319
第二十一章 其他无损检测方法		322
21.1	声发射检测	322
21.1.1	概述	322
21.1.2	物理基础	323
21.1.3	声发射仪	327
21.1.4	实际应用	327
21.2	计算机层析成像检测	328
21.2.1	概述	328
21.2.2	物理基础	330
21.2.3	工业 CT 系统	332
21.2.4	实际应用	335
21.3	激光全息干涉检测	338
21.4	错位散斑干涉检测	339
21.5	红外热像检测	341
21.6	泄漏检测	342
21.7	目视检测	343
	复习思考题	343
第二十二章 无损检测方法的选用原则及典型航空制件无损检测技术		345
22.1	无损检测方法的选用原则	345
22.2	精铸无余量空心涡轮叶片无损检测技术	347
22.2.1	精铸涡轮叶片的射线照相检测	347
22.2.2	精铸涡轮叶片的渗透检测	348
22.2.3	精铸涡轮叶片的残留型心检测	349
22.2.4	精铸涡轮叶片的壁厚测量	349
22.3	大型复杂薄壁精密铸件无损检测技术	350
22.3.1	大型复杂薄壁精密铸件射线照相检测技术	351

22.3.2 大型复杂薄壁精密铸件渗透检测技术	352
22.3.3 大型复杂薄壁精密铸件工业 CT 检测技术	353
22.4 先进聚合物基复合材料无损检测技术	355
复习思考题	360

第四篇 航空无损检测的质量控制

第二十三章 无损检测质量控制相关知识	363
--------------------------	-----

23.1 质量	363
23.2 质量管理	363
23.3 质量控制	364
23.4 检定、溯源、校准、标定及标准样品	364
23.5 法律、法规和规章,标准、规范和规程	365
23.6 无损检测规程与无损检测工艺卡	366
复习思考题	367

第二十四章 航空无损检测质量控制要求	368
--------------------------	-----

24.1 一般要求	368
24.1.1 检测资源	368
24.1.2 质量管理	368
24.1.3 工艺流程	368
24.2 详细要求	369
24.2.1 检测任务接收	369
24.2.2 检测作业质量控制	369
24.2.3 原始记录	375
24.2.4 检测结果解释与评定	376
24.2.5 检测报告	376
24.2.6 被检件交接	376
24.2.7 检测资料归档	376
复习思考题	376

附录 A 金属材料基础知识	378
---------------------	-----

A.1 金属及合金的结构	378
A.2 金属及合金的相图	382
A.3 金属及合金的结晶	387
A.4 金属及合金的变形、回复和再结晶	389
A.5 金属及合金的固态转变	392
A.6 金属材料的性能	393