

中航工业检测及焊接人员资格鉴定与认证

系列培训教材

物理冶金检测技术

刘昌奎 主编



化学工业出版社

中航工业检测及焊接人员资格鉴定与认证

系列培训教材

物理冶金检测技术

刘昌奎 主编

曲士昱	刘德林	孙智君	范金娟	副主编
	陶春虎	郑运荣	何玉怀	审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书分为基础篇和实践篇。基础篇注重基础理论知识的传授,包括了金相实验室基本要求、物理冶金分析技术、铸造组织与变形组织分析、金属的热处理等。实践篇注重实操技能的培训,根据航空物理冶金检测需求,对钢、高温合金、铝合金、钛合金、铜合金、焊接接头、特种工艺条件下的组织特点、缺陷类别与控制、金相检测技术做了详细的讲解。为拓展物理冶金人员视野,还特别介绍了金属断口与失效分析、非金属材料分析技术。

本书内容全面详实、深入浅出,可作为航空物理冶金人员培训教材,也可作为材料与工艺研究人员、失效分析人员、检测人员的参考书,同时也适合航天、兵器、船舶等国防科技领域及高铁、汽车等领域物理冶金人员的培训教材与参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

物理冶金检测技术/刘昌奎主编. —北京: 化学工业出版社, 2015.6

ISBN 978-7-122-23617-3

I. ①物… II. ①刘… III. ①物理冶金-检测
IV. ①TF19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 072175 号

责任编辑: 李晓红

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 王素芹

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$ 字数 426 千字 2015 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64519661

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

丛书编审委员会

主 任 李 伟

副主任 李 莉 陶春虎

委 员 (以姓氏笔画为序)

于 浩	王 斌	王宇魁	尹泰伟	叶 勇
史亦韦	吕 健	刘 嘉	刘昌奎	刘晓燕
闫秀芬	李 伟	李 泽	李 剑	李 莉
李秀芬	杨国腾	杨春晟	杨胜春	何 军
何玉怀	张世林	张田仓	张学军	张银东
武振林	苗蓉丽	欧阳小琴	季 忠	金冬岩
胡成江	侯丽华	徐友良	郭广平	郭子静
陶春虎	黄玉光	章菊华	熊 瑛	

编审委员会秘书处

主 任 宋晓辉

成 员	马 瑞	马文利	任学冬	李 彦	李 轩
	宋晓辉	张文扬	周静怡	赵 梦	盖依冰
	焦泽辉	谢文博	程 琴		

本书编委会

主 任 刘昌奎

副主任 曲士昱 刘德林 孙智君 范金娟

委 员（以姓氏笔画为序）

于润桥	王 红	王志宏	卢增威	曲士昱
纪大满	刘昌奎	刘德林	孙智君	何 军
何玉怀	佟文伟	陆业航	陈 昕	陈国权
陈昌达	张世林	张银东	吴俊璞	范金娟
范映伟	欧阳小琴	周静怡	郑运荣	龚晓宁
黄选民	黄晓华	舒 毅	雷力明	

公元前 2025 年的汉谟拉比法典，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，汉谟拉比法典在总体上并没有得到真正有效的实施，其主要原因在于没有理化检测及评定的技术和方法用以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，汉谟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。而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。

毋庸置疑，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。

为贯彻《军工产品质量管理条例》和 GJB《理化试验质量控制规范》，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成立了“中国航空工业集团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，负责组织中航工业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检测及焊接人员资格认证管理中心组织有关专家编写了“中航工业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中航工业质量安全部领导的大力支持和帮助，也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
检测及焊接人员资格认证管理中心

I 前言 I

I FOREWORD I

物理冶金检测技术涉及材料学、测量学、力学、化学、电磁学等多学科，主要包含材料的组织结构、形貌、微区成分等研究方向，是现代工业的重要基础技术，也是确保材料与产品质量、评价材料与产品性能的重要手段和科学依据。

本书是为航空物理冶金检测Ⅱ、Ⅲ级人员培训所编写，分为基础篇和实践篇。基础篇介绍了金相实验室基本要求、物理冶金分析技术、铸造组织与变形组织分析、金属的热处理等。实践篇根据航空材料和工艺特点，内容涵盖钢、高温合金、铝合金、钛合金、铜合金的组织与检测，还介绍了焊接接头、特种工艺及其检测技术，以及金属断口与失效分析、非金属材料分析技术。本书还可作为其他行业从事物理冶金检测工作的技术人员及物理冶金检测相关专业技术人员的参考书。

全书共分为十四章，第1章由621所阮忠慈、赵文侠编写，第2章由621所曲士昱、郑真编写，第3、4章由621所郑运荣、范映伟编写，第5、6章由621所金建军、刘德林编写，第7、12章由430厂孙智君编写，第8章由132厂何军编写，第9章由621所刘昌奎、周静怡编写，第10章由621所孙凤礼编写，第11章由625所陆业航编写，第13章由621所何玉怀编写，第14章由621所范金娟编写。全书由刘昌奎、范映伟负责统稿，陶春虎、郑运荣、何玉怀负责审定。

本书在编写过程中得到了中航工业北京航空材料研究院、失效分析中心，中国商飞机械失效分析中心的大力支持；得到了各航空厂、所许多同志，以及作为教材试用期间许多学员的热情帮助与支持；得到了中航工业失效分析中心同仁的大力协助，在此表示衷心的感谢。

由于本书内容涉及面广，作者受到工作和认识的局限，书中难免会存在不妥乃至错误之处，恳请读者批评指正并提出宝贵意见。

中航工业物理冶金检测技术教材编审组

基础篇

第 1 章 金相实验室与物理冶金检测概述	2
1.1 金相实验室的通用要求	2
1.1.1 国内相关标准对金相实验室的要求	2
1.1.2 ASTM E807 对金相实验室的要求	7
1.1.3 SAE AS7101 对金相实验室的要求	8
1.2 金相检验通用标准	13
1.3 合金相及合金组织	16
1.3.1 合金相	16
1.3.2 二元合金相图及组织	18
1.3.3 铁碳合金相图的特点	22
1.3.4 碳和杂质元素对碳钢显微组织和性能的影响	23
第 2 章 物理冶金分析技术	25
2.1 光学金相分析	25
2.1.1 光学金相试样制备	25
2.1.2 光学金相显微组织显示	30
2.1.3 光学金相显微组织分析	37
2.2 电子光学分析	40
2.2.1 扫描电子显微术	40
2.2.2 透射电子显微术	41
2.2.3 扫描透射电子显微术	42
2.3 显微硬度测定技术	43
2.3.1 硬度的基本概念	43
2.3.2 显微硬度试验方法	43
2.3.3 显微硬度在金相研究中的应用	48
2.3.4 显微硬度测试技术的新进展	49
2.4 其他分析技术	49
2.4.1 晶体结构测定	49
2.4.2 微区成分分析	50
2.4.3 残余应力测定	50

第 3 章 铸造组织分析	53
3.1 金属结晶的基本规律	53
3.1.1 金属结晶的一般过程	53
3.1.2 金属结晶的能量条件	54
3.1.3 金属结晶的结构条件	54
3.1.4 晶核的形成	55
3.1.5 晶体的长大	56
3.1.6 结晶速率	56
3.2 铸造组织形成与铸造缺陷	57
3.2.1 枝晶	57
3.2.2 晶粒组织	59
3.2.3 偏析	62
3.3 受控凝固组织	66
3.3.1 细晶铸件	66
3.3.2 定向凝固铸件	67
3.3.3 单晶铸件	68
3.3.4 急冷铸件	68
第 4 章 变形组织分析	71
4.1 金属的塑性变形	71
4.1.1 单晶体的塑性变形	71
4.1.2 多晶体的塑性变形	73
4.1.3 合金的塑性变形	74
4.2 塑性变形对金属组织和性能的影响	75
4.2.1 性能的变化	75
4.2.2 显微组织的变化	75
4.2.3 残余应力的变化	77
4.3 回复与再结晶	77
4.3.1 回复	77
4.3.2 再结晶	78
4.3.3 晶粒长大	80
4.3.4 影响再结晶后晶粒大小的因素	82
4.4 金属的热加工组织	83
4.4.1 动态回复与动态再结晶	83
4.4.2 热加工组织控制	84

4.5	冷热加工常见缺陷	86
4.5.1	白点	86
4.5.2	晶粒粗细不均导致冷变形开裂	86
4.5.3	过热与过烧	87
4.5.4	折叠	87
4.5.5	铜脆	87
4.5.6	锻裂	87
第5章	金属的热处理	88
5.1	钢的热处理基本原理	88
5.1.1	概述	88
5.1.2	钢加热时的组织转变	89
5.1.3	过冷奥氏体的转变	91
5.2	钢的热处理工艺与组织	98
5.2.1	钢的退火	98
5.2.2	钢的正火	100
5.2.3	钢的淬火	100
5.2.4	钢的回火	104
5.3	钢的化学热处理	105
5.3.1	化学热处理的一般原理	106
5.3.2	影响化学热处理过程的主要因素	106
5.3.3	钢的渗碳	106
5.3.4	钢的氮化	109
5.3.5	碳氮共渗	110
5.3.6	渗硼	111
5.3.7	渗铝	112
5.4	有色金属的热处理	113
5.4.1	退火	113
5.4.2	固溶处理	115
5.4.3	时效	116
5.4.4	形变热处理	118
5.5	金属的热处理缺陷	118
5.5.1	热处理裂纹	119
5.5.2	热处理变形	126
5.5.3	组织缺陷	127

5.5.4 回火脆性	131
5.5.5 化学热处理和表面热处理缺陷	134

实 践 篇

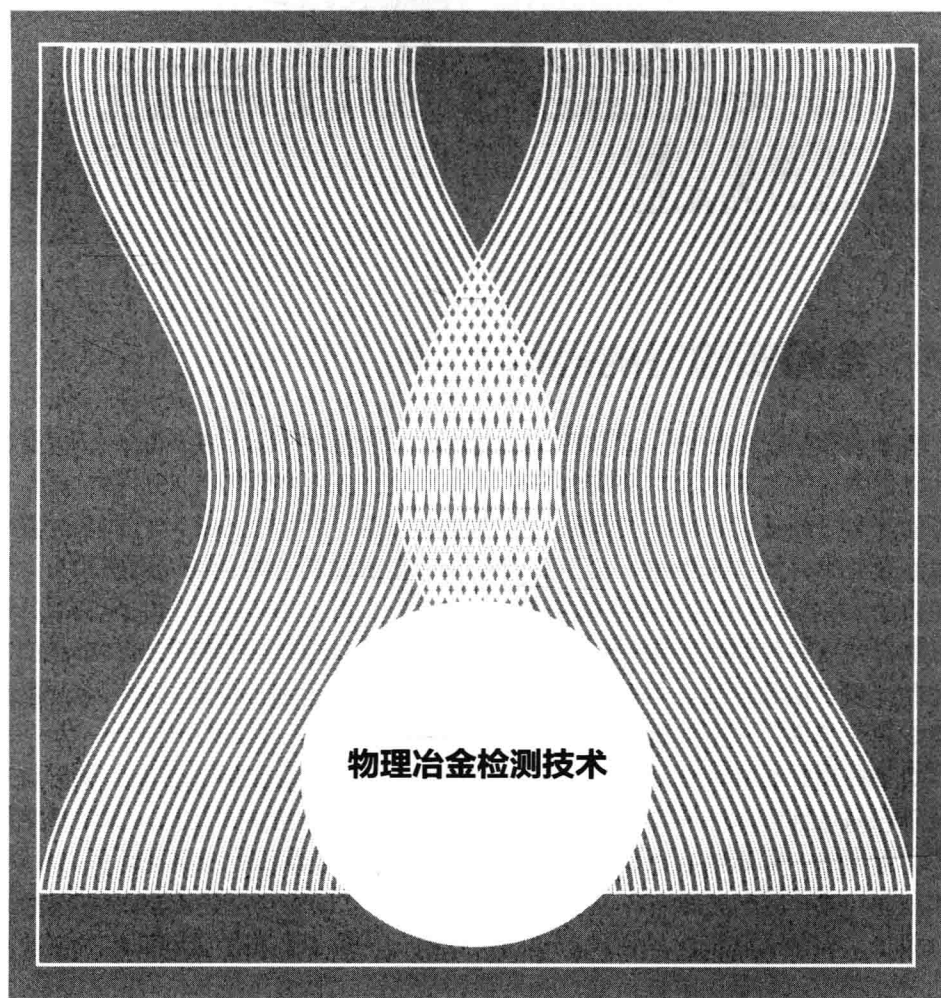
第 6 章 钢的组织与检测	136
6.1 概述	136
6.2 钢的组织	137
6.2.1 结构钢	137
6.2.2 工具钢	143
6.2.3 特殊性能钢	145
6.3 钢的金相检测	153
6.3.1 低倍组织	153
6.3.2 高倍组织	159
第 7 章 高温合金的组织与检测	161
7.1 概述	161
7.2 高温合金的组织	163
7.2.1 高温合金中合金化元素的作用	163
7.2.2 高温合金相构成	166
7.2.3 典型高温合金相随热暴露温度的变化	170
7.3 高温合金的金相检测	173
7.3.1 铸造高温合金组织	174
7.3.2 变形高温合金组织	182
7.3.3 粉末高温合金组织	187
第 8 章 铝合金的组织与检测	190
8.1 概述	190
8.2 铝合金的组织	192
8.2.1 铝合金中组成相的特征及金相鉴别方法	192
8.2.2 铸造铝合金	192
8.2.3 变形铝合金	195
8.2.4 铝合金的强化	197
8.3 铝合金的金相检测	198
8.3.1 低倍组织	198
8.3.2 高倍组织	204

第 9 章	钛合金的组织与检测	208
9.1	概述	208
9.2	钛合金的组织	208
9.2.1	化学元素对钛及其合金的影响	208
9.2.2	钛合金的显微组织	211
9.3	钛合金中常见的缺陷	219
9.3.1	与熔炼工艺相关的缺陷	219
9.3.2	与其他工艺相关的缺陷	226
9.3.3	钛合金的表面污染	235
第 10 章	铜合金的组织与检测	237
10.1	概述	237
10.2	铜合金的组织	238
10.2.1	纯铜	238
10.2.2	黄铜	238
10.2.3	白铜	240
10.2.4	青铜	240
10.3	铜合金的金相检测	243
10.3.1	低倍组织	243
10.3.2	高倍组织	243
10.3.3	铜及铜合金产品的常见缺陷	244
第 11 章	焊接接头的组织与检测	247
11.1	概述	247
11.1.1	焊接的物理本质	247
11.1.2	焊接的分类	249
11.2	焊接接头的组织	251
11.2.1	区域划分	251
11.2.2	熔焊接头金相组织	252
11.2.3	钎焊接头金相组织	256
11.2.4	压焊接头金相组织	260
11.3	焊接缺陷与检测	262
11.3.1	焊接缺陷	262
11.3.2	焊接金相检测	267
第 12 章	特种工艺组织及其检测	270
12.1	概述	270

12.2	激光、电火花加工及其检测	272
12.2.1	激光、电火花加工特点	272
12.2.2	激光、电火花加工缺陷组织	273
12.2.3	激光、电火花加工检测	276
12.3	镀层、阳极化与化学氧化膜及其检测	277
12.3.1	化学、电化学加工特点	277
12.3.2	镀层组织缺陷及其检测	279
12.3.3	阳极化及化学氧化膜检测	284
12.4	热喷涂涂层及其检测	285
12.4.1	热喷涂工艺特点及其涂层组织	285
12.4.2	热喷涂涂层检测	287
12.5	喷丸及其检测	297
12.5.1	喷丸工艺特点	297
12.5.2	喷丸检测	298
第 13 章	金属断口与失效分析	302
13.1	断口分析的作用及意义	302
13.2	断裂分类	302
13.3	断口特征	305
13.3.1	断裂机理与断口典型特征	305
13.3.2	不同断裂失效模式的断口特征	308
13.4	断口分析内容	318
13.4.1	断口的获得	318
13.4.2	断口宏观分析	320
13.4.3	断口微观分析	321
13.4.4	断口的特殊分析	322
13.5	裂纹与断裂失效分析	323
13.5.1	断裂失效分析中的裂纹分析	323
13.5.2	断裂起源和扩展途径分析	328
13.5.3	断裂原因分析	330
第 14 章	非金属材料分析技术	333
14.1	概述	333
14.1.1	材料与制件在结构上的不均匀性	333
14.1.2	高分子材料的黏弹性	334
14.2	非金属材料的常见缺陷	335

- 14.2.1 橡胶材料的常见缺陷335
 - 14.2.2 塑料的常见缺陷336
 - 14.2.3 树脂基复合材料的常见缺陷340
- 14.3 非金属材料常用检测方法344
 - 14.3.1 表面形貌与污染分析344
 - 14.3.2 界面分析344
 - 14.3.3 成分分析345
- 参考文献346

基础篇



第1章

金相实验室与物理冶金检测概述

1.1 金相实验室的通用要求

随着我国航空工业的日益发展和壮大,航空企业对外转包生产的规模日益扩大,供货商对产品或产品有关的材料的控制也更加重视和规范化。一些实验室被国外的著名厂商认证,取得了国际认可的检测资格。例如:2002年,加拿大普惠公司经过几个月的认真考核,给了北京航空材料研究院包括金相、化学和力学性能在内的17个测试项目许可;2004年,美国GE公司也给了该院相关检测项目许可。这样使这些材料实验室的管理和运转与国际管理接轨,为转包生产产品的质量控制提供了便利条件。本篇有必要增加一些金相实验室认证的有关内容,以适应当前越来越多厂(所)的产品参与国际竞争的需要。

对于商用和机构内部实验室通常提出了诸多通用要求。例如美国国家宇航和国防承包商认证程序(NADCAP)以SAE AS7101标准档形式给出,对实验室提出了详细要求,主要包括如下项目:实验室认可;质量组织;设备;体系;人员;体系程序;试样标识与跟踪;设备校准与维护;替代试验与重复试验;试验误差;试验报告;试验的联机存档;试验记录;试验结果的保留与重复利用;各实验室间的对比试验;安全;审核;分包;培训和资格;试验人员等。

1.1.1 国内相关标准对金相实验室的要求

国内对于金相实验室的认证机构主要有CNAS、DILAC三方认证,中航工业