

船员适任培训与航海教育专业核心课程统一教材 // 轮机工程技术 ▶

# 船舶主推进动力装置

(操作级) ■

交通运输部海事局组织编写

主编单位

青岛港湾职业技术学院  
武汉理工大学  
青岛远洋船员职业学院  
泉州海洋职业学院  
浙江海洋大学

人民交通出版社股份有限公司

北京

## 图书在版编目(CIP)数据

船舶主推进动力装置/交通运输部海事局组织编写  
—北京:人民交通出版社股份有限公司, 2022.7  
ISBN 978-7-114-17980-8

I. ①船… II. ①交… III. ①船舶推进—动力装置—  
教材 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 107500 号

Chuanbo Zhutuijin Dongli Zhuangzhi

书 名: 船舶主推进动力装置  
著 者: 交通运输部海事局  
责任编辑: 杨 川  
责任校对: 席少楠 刘 璇  
责任印制: 刘高彤  
出版发行: 人民交通出版社股份有限公司  
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号  
网 址: <http://www.chinasybook.com>  
销售电话: (010)64981400, 59757915  
总 经 销: 北京交实文化发展有限公司  
印 刷: 北京印匠彩色印刷有限公司  
开 本: 787 × 1092 1/16  
印 张: 34  
字 数: 807 千  
版 次: 2022 年 7 月 第 1 版  
印 次: 2022 年 7 月 第 1 次印刷  
书 号: ISBN 978-7-114-17980-8  
定 价: 95.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 编审人员名单

## 理论知识编写组

主 编:尹志生(武汉理工大学)

温小飞(浙江海洋大学)

盛善智(烟台大学)

副主编:孙 鹏(大连海洋大学)

张德福(天津理工大学)

## 教学实训编写组

主 编:刘西全(青岛港湾职业技术学院)

占惠文(湖北交通职业技术学院)

田 彪(武汉船舶职业技术学院)

副主编:戴 武(渤海船舶职业学院)

倪文利(山东交通职业学院)

张英华(江苏海事职业技术学院)

## 情景实操编写组

主 编:王见闻(泉州海洋职业学院)

孙化栋(青岛远洋船员职业学院)

陈培红(江苏航运职业技术学院)

副主编:宋 云(武汉海事职业学院)

仝永臣(青岛远洋船员职业学院)

赵云岷(青岛港湾职业技术学院)

主 审:王忠诚(上海海事大学)

参 编:毛宏雨 孙长飞 李亮宽 马志超 葛 涛

陈 耿 袁建斌 吕 明 李 勇 刘文科

黄文龙 陈锡华 刘海涛 操江能



# 关于本套教材

## 一、本套教材编写特点

### 1. 体例创新,以“用”带学

2021年10月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于推动现代职业教育高质量发展的意见》,文件中明确提出了要“改进教学内容与教材”。依据这一文件精神,结合航海职业教育改革要求和航海专业课程教学创新要求,本套教材将航海业务进行了“情境化”处理,以“操作要点”这一“用”为中心,将航海业务中需掌握的必备知识、相关知识进行整合、优化,将学生的学习场景带入到实际工作的情境中来,明确学生的学习任务,增加学生学习兴趣,提升学生实践能力。

### 2. 结构新颖,利于掌握

本套教材由若干个教学情境构成,这些情境完全按照生产实际和岗位需求来设计。每个教学情境又包含了“情境导读”“必备知识”“操作要点”等内容,每个“必备知识”/“操作要点”通过【解释】【相关知识】【经验指导】等栏目逐层递进,最大程度上利于学生对这些知识和技能吸收和掌握。

【解释】通过设置一系列醒目的小标题(带有●记号的标题),对“必备知识”/“操作要点”的内容进行详细讲解、说明。

【相关知识】对与该“必备知识”/“操作要点”相关的知识点、关键词、公式、术语等作扼要的说明。

【经验指导】对与“必备知识”/“操作要点”有关的实际应用知识进行提示、指导,向读者传授航海实际作业经验。

### 3. 课证融通,学以致用

依据《高等职业学校轮机工程技术专业教学标准》中教学内容要求进行编写,以各种场景“操作要点”为主线,辅以必会的理论知识、经验指导和典型案例等,符合航海类专业的“课证融通”职业教育特点,实现理论和实践的有机融合。

## 二、本套教材使用方法

### 1. 教学情境的使用方法

本套教材设立了若干个教学情境,每个教学情境下的“必备知识”/“操作要点”,均是航海专业必须掌握的重点知识,也是《高等职业学校轮机工程技术专业教学标准》要求的教学内容,这些重点内容,在实际操作时能够给航海专业人员带来很多参考和帮助。带有●记号的标题是本套教材对于“必备知识”/“操作要点”所提炼出的关键词,它能直接扼要地表明在航海专业中应注意的知识要点和应掌握的技能要点。

## 2. “热题库”自主学习系统的使用

本套教材配套了“热题库”自主学习系统,学生可以通过微信[扫一扫],扫描下方的二维码进入该系统。



“热题库”自主学习系统是一款满足学生课前预习、课后复习的基于微信公众号平台的配合专业课程教学和学习系统。该系统根据学生自主学习的特点,在功能上设置了“新题练习”“热题研习”“熟题重温”“错题重做”“机编模拟”和“典型试卷”六大功能,在内容上又开发了“互动教材”和“经典习题”,“互动教材”作为课前预习的内容与教师课堂教学相呼应,“经典习题”作为课后复习的内容满足学生学习巩固的需要。另外,本系统还可以由教师组建班级,学生加入到“我的班级”,可以使老师实时了解学生的学习动态和课堂教学效果。

“热题库”自主学习系统的使用方法如下:

(1)使用微信[扫一扫]扫描上方的二维码,关注公众号。

(2)点击公众号下方菜单中的“练·热题”进入。

(3)点击“更多考试”,选择想要学习的科目进入。

(4)当点击任意模块出现收费界面时,可以选择“输入激活码”,刮开图书封底的激活码涂层,在激活码页面输入激活码,即可免费使用。

(本激活码也可以激活公众号下的其他科目,一经激活,本码作废,请谨慎使用)

## 3. 课堂互动教学系统的使用

本套教材配套了课堂互动教学系统,该系统由后台管理(教师使用)和课堂前端(师生共用)两部分组成。

(1)后台管理(教师使用)的注册和使用

教师通过关注“水运书摘”微信公众号,点击下方“练·热题”进入首页,点击下方“公号档案”功能区中的“教师注册”,刮开由人民交通出版社股份有限公司发放的“教师邀请卡”上的涂层,在“教师注册”页面输入激活码,即可进入“教师工作区”。教师还可以在“教师注册”页面采用“手机短信激活”的方式进行注册,具体方式如下:输入“教师姓名”、选择“所在学校”,并用手机接收验证码并输入后,完成注册。教师通过点击“教师工作区”中的“教师信息”可以获得后台管理(教师使用)的登录名和密码,使用电脑端的IE浏览器输入网址:“<https://retiku.cn/manager/jtclick.html>”,输入登录名和密码,即可进入课堂教学互动系统的后台管理。在后台管理中,教师可在“PPT课件”中下载获取相应教材的配套课件,还可从“课件管理”和“共享课件”中编辑和生成自己的互动课件,共享自己认为满意的互动课件给同行教师。

(2)课堂前端(师生共用)的使用

课堂前端(师生共用)包括一套互动教学设备,教师通过该设备调取后台管理中教师自

主编辑生成的互动课件,用于课堂教学。学生通过答题器与教师产生互动。教师通过使用该系统,一方面,可以实时了解学生的课堂学习动态,不断调整教学重点;另一方面,还可以调动学生课堂听课的积极性,提高学生的课堂学习效率。

### 三、“案例进课堂”资源获取

为了着力推行产教融合的职业教育模式,统筹规划课程体系与教材建设,强化立体化数字资源建设,本书同步推出了“案例进课堂”资源库,实现了教学模式上的创新,便于教师授课和学生扩展知识的学习。

“案例进课堂”资源库可以通过以下方式获取:

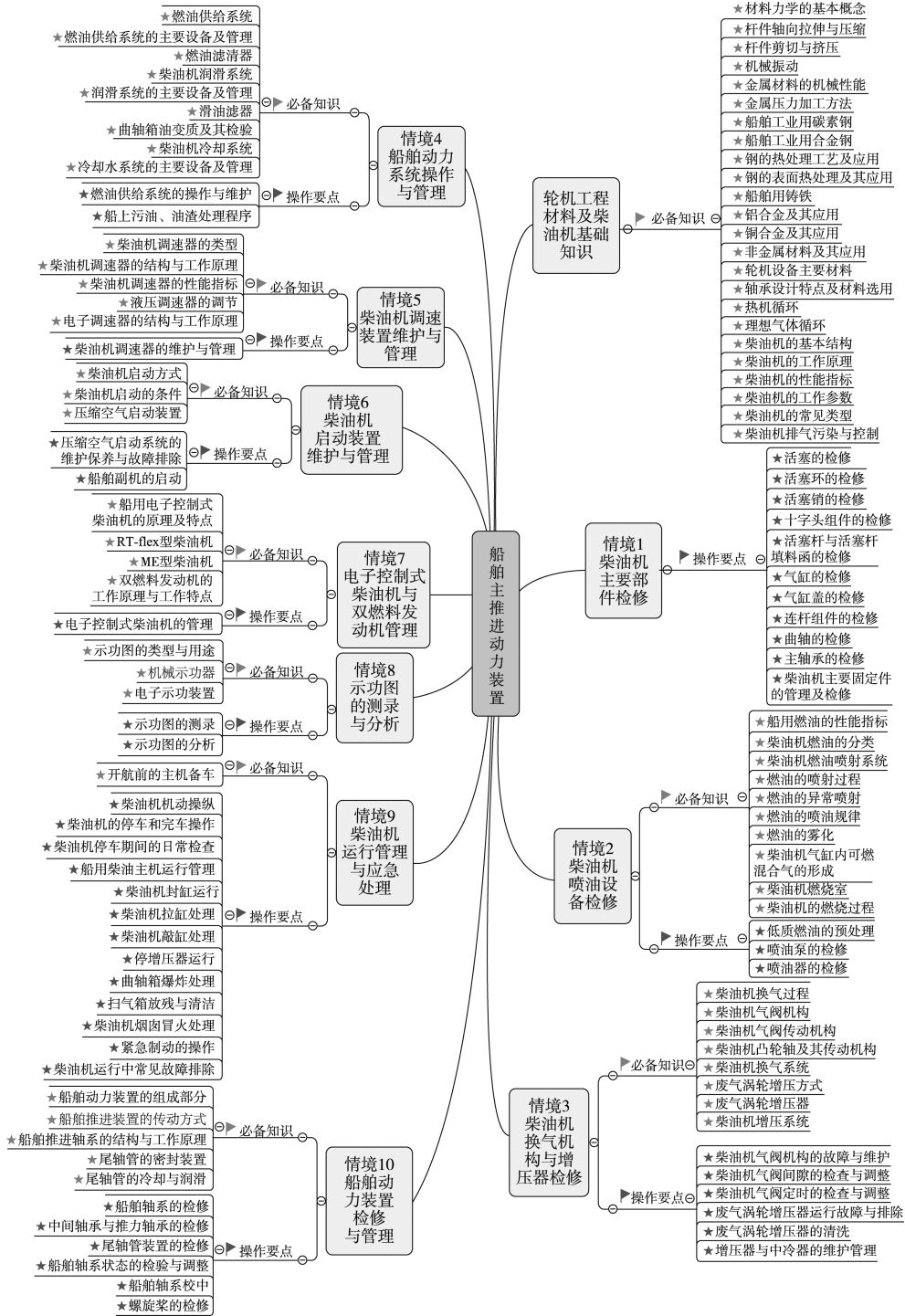
Windows 系统的电脑客户端,可通过 IE 浏览器,输入以下网址:

<http://www.chinasybook.com/tas.zip>

进行下载安装(下载文件中含说明书)。



# 关于本书



《船舶主推进动力装置》知识导图



# 前言

2020年12月,船员考试管理改革工作会议在深圳召开,交通运输部海事局就启动船员适任培训统一教材编写工作作了部署。

2021年6月,交通运输部海事局在人民交通出版社股份有限公司召开集中办公会议,研讨船员适任培训统一教材编写思路,明确了“用什么、教什么、考什么”的教材建设原则。明确要以《中华人民共和国海船船员适任考试和发证规则》《海船船员培训大纲(2021版)》为依据,兼顾《高等职业学校航海技术专业教学标准》《高等职业学校轮机工程技术专业教学标准》,既要满足船员适任培训实际需求,也要服务航海职业教育改革国家战略。

为了众筹各方智慧,妥善做好教材建设的具体工作,2021年6月,部海事局发布了《交通运输部海事局关于征集操作级船员适任培训教材编写人员的通知》,启动教材编审人员征集工作,得到来自航海本科、高职高专院校老师和航运企事业单位专家的广泛响应,有力支持了统一教材编审人员的遴选工作。

2021年10月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于推动现代职业教育高质量发展的意见》,结合交通运输部等六部委联合发布的《关于加强高素质船员队伍建设的指导意见》,统一教材建设既要契合国家对职业教育改革的愿景目标,也要满足行业打造合格产业劳动者大军对培训考试方式的改革诉求,教材建设需要从内容上、形式上和功能上进行系统性创新。

本套教材在内容上,力求知识满足实际需求,实现航海职业教育知识体系与船员适任培训场景的融合与孪生,实现案例进课堂;在表现形式上,以情境设计为导向,突出知识与实操的关联性,实现纸质教材与数字教材的相互融合;在功能上,以数字教材为基础,配套课堂教学互动课件和满足课前预习、课后复习需求的“热题库”自主学习系统等教学工具,寓教于问、寓学于答。

此外,正在行业推广应用的“船员岗位培训与评估系统”,可为航海新技术、新设备、新法规等方面的知识反哺与更新建立有效机制。

按照编写人员专业特点,本套教材各科目编写组分为理论知识、情境实操和教学实训三个单元。

本套教材包括船舶管理、海上货物运输、航海学(船舶定位与导航)、航海学(航海仪器操作)、航海学(气象观测与分析)、船舶操纵、船舶值班与避碰、航海英语、船舶管理(含机舱资源管理)、船舶主推进动力装置、船舶辅机、船舶电气、轮机自动化、轮机维护与修理、轮机英语15门课程。

在教材编审过程中,得到了航海教育培训研究分委会、各直属海事局、各航海院校、相关航运企事业单位和人民交通出版社股份有限公司的关心和支持,在此一并表示感谢。

交通运输部海事局  
2022年7月



# 目录

<b>轮机工程材料及柴油机基础知识</b> .....	1
必备知识 1: 材料力学的基本概念 .....	2
必备知识 2: 杆件轴向拉伸与压缩 .....	6
必备知识 3: 杆件剪切与挤压 .....	12
必备知识 4: 机械振动 .....	14
必备知识 5: 金属材料的机械性能 .....	17
必备知识 6: 金属压力加工方法 .....	20
必备知识 7: 船舶工业用碳素钢 .....	25
必备知识 8: 船舶工业用合金钢 .....	28
必备知识 9: 钢的热处理工艺及应用 .....	34
必备知识 10: 钢的表面热处理及其应用 .....	43
必备知识 11: 船舶用铸铁 .....	47
必备知识 12: 铝合金及其应用 .....	52
必备知识 13: 铜合金及其应用 .....	55
必备知识 14: 非金属材料及其应用 .....	61
必备知识 15: 轮机设备主要材料 .....	65
必备知识 16: 轴承设计特点及材料选用 .....	75
必备知识 17: 热机循环 .....	81
必备知识 18: 理想气体循环 .....	83
必备知识 19: 柴油机的基本结构 .....	90
必备知识 20: 柴油机的工作原理 .....	100
必备知识 21: 柴油机的性能指标 .....	108
必备知识 22: 柴油机的工作参数 .....	113
必备知识 23: 柴油机的常见类型 .....	116
必备知识 24: 柴油机排气污染与控制 .....	120
<b>情境 1 柴油机主要部件检修</b> .....	123
操作要点 1: 活塞的检修 .....	124
操作要点 2: 活塞环的检修 .....	134
操作要点 3: 活塞销的检修 .....	144
操作要点 4: 十字头组件的检修 .....	146
操作要点 5: 活塞杆与活塞杆填料函的检修 .....	150

	操作要点 6:气缸的检修 .....	152
	操作要点 7:气缸盖的检修 .....	160
	操作要点 8:连杆组件的检修 .....	166
	操作要点 9:曲轴的检修 .....	172
	操作要点 10:主轴承的检修 .....	189
	操作要点 11:柴油机主要固定件的管理及检修 .....	196
<b>情境 2</b>	<b>柴油机喷油设备检修 .....</b>	<b>202</b>
	必备知识 1:船用燃油的性能指标 .....	203
	必备知识 2:柴油机燃油的分类 .....	210
	必备知识 3:柴油机燃油喷射系统 .....	215
	必备知识 4:燃油的喷射过程 .....	218
	必备知识 5:燃油的异常喷射 .....	220
	必备知识 6:燃油的喷油规律 .....	222
	必备知识 7:燃油的雾化 .....	224
	必备知识 8:柴油机气缸内可燃混合气的形成 .....	226
	必备知识 9:柴油机燃烧室 .....	228
	必备知识 10:柴油机的燃烧过程 .....	231
	操作要点 11:低质燃油的预处理 .....	238
	操作要点 12:喷油泵的检修 .....	241
	操作要点 13:喷油器的检修 .....	254
<b>情境 3</b>	<b>柴油机换气机构与增压器检修 .....</b>	<b>260</b>
	必备知识 1:柴油机换气过程 .....	261
	必备知识 2:柴油机气阀机构 .....	265
	必备知识 3:柴油机气阀传动机构 .....	269
	必备知识 4:柴油机凸轮轴及其传动机构 .....	272
	必备知识 5:柴油机换气系统 .....	275
	必备知识 6:废气涡轮增压方式 .....	278
	必备知识 7:废气涡轮增压器 .....	282
	必备知识 8:柴油机增压系统 .....	291
	操作要点 9:柴油机气阀机构的故障与维护 .....	293
	操作要点 10:柴油机气阀间隙的检查与调整 .....	295
	操作要点 11:柴油机气阀定时的检查与调整 .....	298
	操作要点 12:废气涡轮增压器运行故障与排除 .....	300
	操作要点 13:废气涡轮增压器的清洗 .....	304
	操作要点 14:增压器与中冷器的维护管理 .....	306

<b>情境 4</b>	<b>船舶动力系统操作与管理</b> .....	308
	必备知识 1:燃油供给系统 .....	309
	必备知识 2:燃油供给系统的主要设备及管理 .....	313
	必备知识 3:燃油滤清器 .....	318
	必备知识 4:柴油机润滑系统 .....	322
	必备知识 5:润滑系统的主要设备及管理 .....	332
	必备知识 6:滑油滤器 .....	336
	必备知识 7:曲轴箱油变质及其检验 .....	338
	必备知识 8:柴油机冷却系统 .....	341
	必备知识 9:冷却水系统的主要设备及管理 .....	345
	操作要点 10:燃油供给系统的操作与维护 .....	348
	操作要点 11:船上污油、油渣处理程序 .....	352
<b>情境 5</b>	<b>柴油机调速装置维护与管理</b> .....	353
	必备知识 1:柴油机调速器的类型 .....	354
	必备知识 2:柴油机调速器的结构与工作原理 .....	357
	必备知识 3:柴油机调速器的性能指标 .....	365
	必备知识 4:液压调速器的调节 .....	368
	必备知识 5:电子调速器的结构与工作原理 .....	371
	操作要点 6:柴油机调速器的维护与管理 .....	373
<b>情境 6</b>	<b>柴油机启动装置维护与管理</b> .....	376
	必备知识 1:柴油机启动方式 .....	377
	必备知识 2:柴油机启动的条件 .....	379
	必备知识 3:压缩空气启动装置 .....	381
	操作要点 4:压缩空气启动系统的维护与故障排除 .....	390
	操作要点 5:船舶副机的启动 .....	392
<b>情境 7</b>	<b>电子控制式柴油机与双燃料发动机管理</b> .....	396
	必备知识 1:船用电子控制式柴油机的原理及特点 .....	397
	必备知识 2:RT-flex 型柴油机 .....	399
	必备知识 3:ME 型柴油机 .....	407
	必备知识 4:双燃料发动机的工作原理与工作特点 .....	412
	操作要点 5:电子控制式柴油机的管理 .....	417
<b>情境 8</b>	<b>示功图的测录与分析</b> .....	418
	必备知识 1:示功图的类型与用途 .....	419
	必备知识 2:机械示功器 .....	422
	必备知识 3:电子示功装置 .....	425

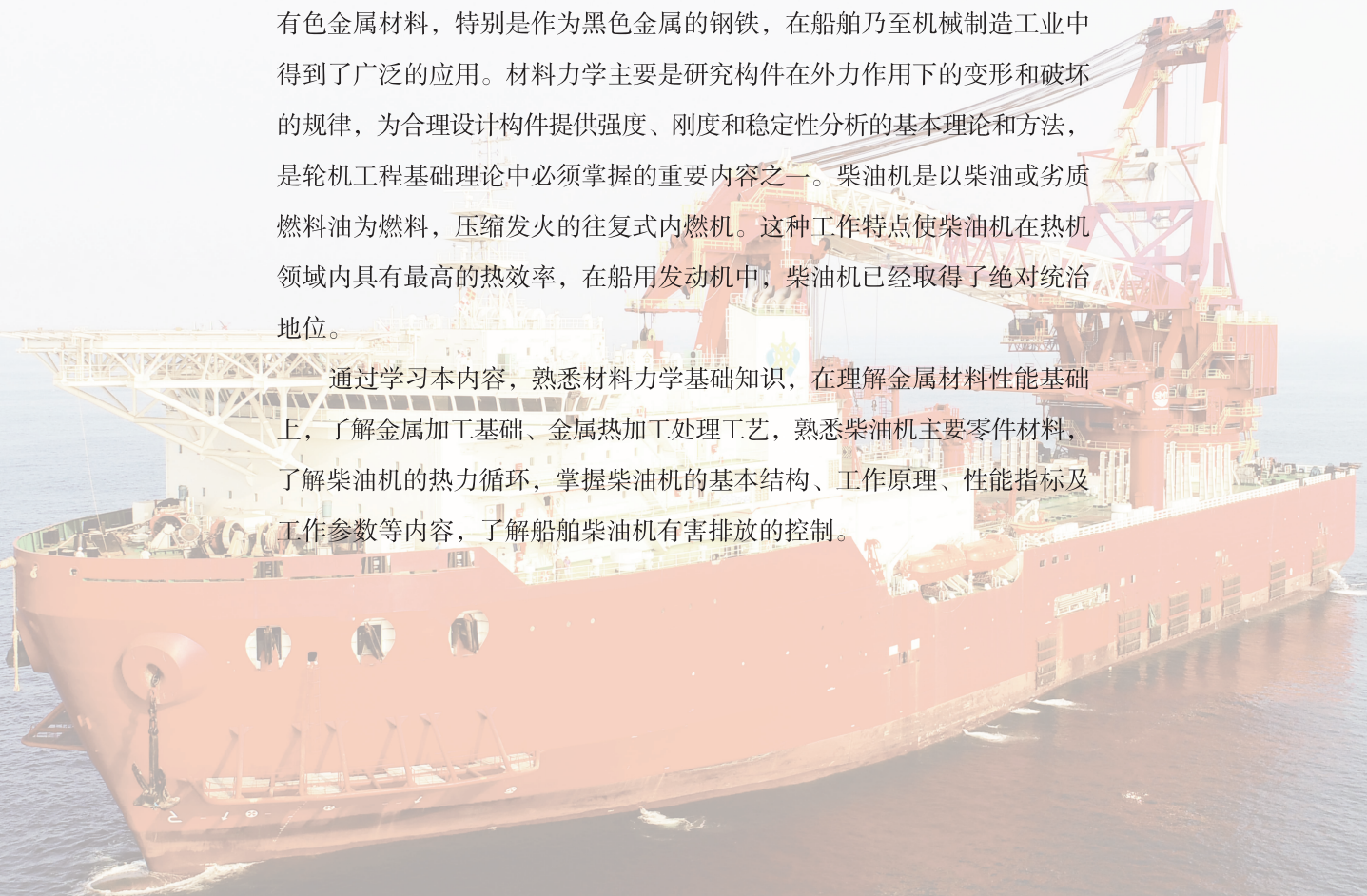
操作要点 4:示功图的测录 .....	428
操作要点 5:示功图的分析 .....	429
<b>情境 9 柴油机运行管理与应急处理 .....</b>	<b>436</b>
必备知识 1:开航前的主机备车 .....	437
操作要点 2:柴油机机动操纵 .....	441
操作要点 3:柴油机的停车和完车操作 .....	443
操作要点 4:柴油机停车期间的日常检查 .....	445
操作要点 5:船用柴油主机运行管理 .....	447
操作要点 6:柴油机封缸运行 .....	452
操作要点 7:柴油机拉缸处理 .....	455
操作要点 8:柴油机敲缸处理 .....	458
操作要点 9:停增压器运行 .....	460
操作要点 10:曲轴箱爆炸处理 .....	462
操作要点 11:扫气箱放残与清洁 .....	466
操作要点 12:柴油机烟囪冒火处理 .....	469
操作要点 13:紧急制动的操作 .....	471
操作要点 14:柴油机运行中常见故障排除 .....	473
<b>情境 10 船舶动力装置检修与管理 .....</b>	<b>477</b>
必备知识 1:船舶动力装置的组成部分 .....	478
必备知识 2:船舶推进装置的传动方式 .....	481
必备知识 3:船舶推进轴系的结构与工作原理 .....	485
必备知识 4:尾轴管的密封装置 .....	495
必备知识 5:尾轴管的冷却与润滑 .....	498
操作要点 6:船舶轴系的检修 .....	500
操作要点 7:中间轴承与推力轴承的检修 .....	503
操作要点 8:尾轴管装置的检修 .....	506
操作要点 9:船舶轴系状态的检验与调整 .....	509
操作要点 10:船舶轴系校中 .....	512
操作要点 11:螺旋桨的检修 .....	516
<b>参考文献 .....</b>	<b>528</b>

# 轮机工程材料及柴油机基础知识

## 情境导读

材料、能源与信息是人类社会发展的三大支柱，其中材料按物理化学属性分，可分为金属材料和非金属材料两大类。金属材料包括黑色金属和有色金属材料，特别是作为黑色金属的钢铁，在船舶乃至机械制造工业中得到了广泛的应用。材料力学主要是研究构件在外力作用下的变形和破坏的规律，为合理设计构件提供强度、刚度和稳定性分析的基本理论和方法，是轮机工程基础理论中必须掌握的重要内容之一。柴油机是以柴油或劣质燃料油为燃料，压缩发火的往复式内燃机。这种工作特点使柴油机在热机领域内具有最高的热效率，在船用发动机中，柴油机已经取得了绝对统治地位。

通过学习本内容，熟悉材料力学基础知识，在理解金属材料性能基础上，了解金属加工基础、金属热加工处理工艺，熟悉柴油机主要零件材料，了解柴油机的热力循环，掌握柴油机的基本结构、工作原理、性能指标及工作参数等内容，了解船舶柴油机有害排放的控制。





## 必备知识 1 : 材料力学的基本概念

### 要 点

材料力学主要研究构件在外力作用下的变形和破坏的规律,为合理设计构件提供强度、刚度和稳定性分析的基本理论和方法,本必备知识主要介绍弹性、塑性、载荷、内力和应力等基本概念,以及衡量构件承载能力的标准、杆件变形的基本形式等内容。

### 解 释

#### ● 弹性与塑性

弹性是指物体发生形变后,能恢复原来大小和形状的性质;塑性是指在外力作用下,材料能稳定地发生永久变形而不破坏其完整性的能力。

#### ● 载荷

在材料力学中,将所有其他物体作用在所研究物体上的力和力偶,统称为外力。外力可分为主动力(载荷)和反作用力两大类。

载荷是作用于构件和机件上的主动力,它是外力的一种形式。外力的另一种形式是支座反力,即支座对于构件的反作用力,它是非主动力。常见的载荷有重力、惯性力、汽压力、水压力和液压力等。

##### 1. 静载荷与动载荷

载荷按大小、方向和作用点是否随时间的变化可分为静载荷和动载荷。

##### (1) 静载荷

静载荷包括不随时间变化的恒载(如自重)和加载变化缓慢以致可以略去惯性作用的准静载荷(如锅炉压力)。

##### (2) 动载荷

动载荷包括短时间快速作用的冲击载荷(如空气锤)、随时间作周期性变化的周期载荷(如空气压缩机曲轴)和非周期变化的随机载荷(如柴油机曲轴、连杆承受的载荷)。

##### 2. 集中载荷与分布载荷

载荷按其在构件上的分布情况分为集中载荷和分布载荷。

##### (1) 集中载荷

作用在构件上很小面积或近似当作在某一点上的载荷。集中载荷是一种近似的简化,



无论作用的面积如何小,也不可能小到一点,例如对横梁的压力等。

### (2) 分布载荷

均匀分布在结构物上的载荷称为分布载荷,简称均布载荷。它又可分为体载荷、面载荷和线载荷。体载荷:连续作用在构件内部每一个质点上的载荷,如重力、磁力、惯性力等。面载荷:作用于构件表面上的载荷,如船底、水库堤坝上的液压力等。线载荷:如分布在梁上的载荷。

### 3. 名义载荷与计算载荷

载荷按设计计算情况可分为名义载荷和计算载荷。

#### (1) 名义载荷和载荷系数 $K$

根据额定功率用力学公式计算出的作用在构件上的载荷,称为名义载荷(额定载荷)。名义载荷并没有反映出载荷随时间作用的不稳定性、载荷在构件上分布的不均匀性及其他影响构件受力情况等因素。这些因素的综合影响,通常用载荷系数  $K$  来估算,通常  $K > 1$ 。

#### (2) 计算载荷

名义载荷与载荷系数的乘积,称为计算载荷。它是考虑实际情况,对构件进行计算用的载荷。

## ● 内力

内力是指构件内部两相邻部分之间的相互作用力。构件在受外力之前,内部各相邻质点之间,已存在着相互作用的内力。正是这种内力使各质点保持一定的相对位置,并使构件具有一定的几何尺寸和形状。构件受外力作用后,在其产生形变的同时,其内部也因各部分之间相对位置的改变而引起内力的改变。

内力的变化量即为外力引起的附加内力。这种附加内力将随外力的增加而增大,当其达到某一限度时,就会引起构件的破坏。材料力学中所研究的内力系指这种附加内力。

内力(偶)可以分为轴力、剪力、扭矩和弯矩。

(1) 轴力:沿着杆件轴线方向的内力,使杆件产生伸长或压缩变形,伸长变形即拉力,为正;压缩变形即压力,为负。

(2) 剪力:作用于截面内的内力,使两个相邻截面产生相互平行的错动。

(3) 扭矩:作用于截面内的内力偶,使两个相邻截面产生绕杆件轴线的相对转动,这种变形称为扭转变形。

(4) 弯矩:垂直于横截面的内力偶,使两个相邻截面产生绕横截面上的某一轴线的相对转动,这种变形称为弯曲变形。

工程上将只承受拉伸的杆件统称为拉杆,简称杆;只承受压缩的杆件统称为压杆或柱;主要承受扭转的杆件统称为轴;主要承受弯曲的杆件统称为梁。

工程上研究强度问题,需要知道哪些横截面可能最先发生失效,这些横截面被称为危险截面。内力分量最大的横截面就是首先需要考虑的危险截面。内力分量沿着杆件长度方向变化的分布情况,可以用杆件的内力图来表示。

## ● 应力

所谓应力,是指内力在截面上的分布密集程度,即单位面积上的内力。如图 0-1 所示,

为了表示截面  $m-m$  上某点  $k$  的应力,围绕点  $k$  取一微小面积  $\Delta A$ ,设  $\Delta P$  是作用在该微小面积  $\Delta A$  上的内力,则:

$$p_m = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (0-1)$$

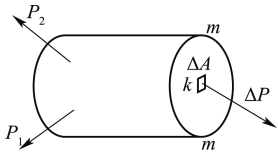


图 0-1 作用在微小面积  $\Delta A$  上的内力

$p_m$  称为作用在微小面积  $\Delta A$  上的平均应力。当内力分布不均匀时,平均应力  $p_m$  值将随  $\Delta A$  的大小而变化,因此它不能确切地反映点  $k$  内力的集度。只有当  $\Delta A$  无限趋于零时, $p_m$  的极限  $p$ ,才能代表点  $k$  的内力集度,用公式表示为:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (0-2)$$

总应力  $p$  是向量,常用两个分量来表示:一个是沿截面法线方向的分量,称为正应力或法向应力,用  $\sigma$  表示;另一个是沿截面切线方向的分量,称为剪应力或切向应力,用  $\tau$  表示。应力单位为帕 (Pa)、千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa),且  $1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

## 相关知识

### ● 衡量构件承载能力的标准

构件是由不同的可变形固体材料制成的,如钢、铸铁、混凝土等,这些材料在外力的作用下都会发生几何形状及尺寸的变化,即产生变形,如果构件所受的外力超过了它的承载能力,将产生较大的变形,甚至发生破坏。因此,要保证构件在外力作用下正常工作,构件必须满足以下 3 个基本要求:

#### 1. 构件应具有足够的强度

强度是指构件在载荷作用下抵抗破坏(断裂或产生明显塑性变形)的能力。例如,起重钢索不允许被重物拉断,齿轮的轮齿不允许破损,梁和轴不允许断裂。

#### 2. 构件应具有足够的刚度

刚度是指构件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力。构件在载荷作用下尽管不发生断裂,但当其变形过大时,也会影响构件的正常工作。例如,车床主轴变形过大就会影响加工精度,齿轮轴发生弯曲变形后齿轮就不能正常啮合,并造成轴承磨损不均匀等。

#### 3. 构件应具有足够的稳定性

稳定性是指构件在载荷作用下保持其原有平衡状态、抵抗失稳的能力。有些构件在载荷作用下,虽然有足够的强度和刚度,但却不能保持其原有的平衡状态,而会突然发生弯曲。例如,柴油机活塞杆、连杆、配气机构的顶杆、起货机吊杆、千斤顶的螺杆、液压装置的活塞杆以及桁架结构的压杆等。

在压力不太大时可以保持原来直线状态而平衡,而当压力达到某一临界值后,则会发生突然弯曲的现象,这种现象称为丧失稳定。在工程实际中,若构件的截面尺寸过小,或选用材料不当,在外力作用下将不能满足强度、刚度和稳定性的要求,从而影响构件的正常工作;反之,为提高构件的强度、刚度和稳定性,可选用优质材料或加大构件截面尺寸,但构件的承载能力却未必能充分发挥,既浪费了材料,又增加了机械的重量和成本。

## ● 杆件变形的的基本形式

在工程结构和机械中,杆件受力的情况是多种多样的,因而所引起的变形也是各式各样的,它们常常是由以下4种基本变形形式所组成。

### 1. 轴向拉伸或压缩

这种变形是由一对大小相等、方向相反、作用线与杆轴线重合的外力作用在杆的两端,使杆在轴线方向发生伸长变形或缩短变形,如图0-2a)、b)所示。例如,柴油机连杆在进气和膨胀冲程受拉压交变作用。

### 2. 剪切

这种变形是由一种大小相等、方向相反、作用线相距很近且垂直于杆轴的外力作用在杆的两侧,使杆件相邻两截面沿外力作用方向产生相对错位,如图0-2c)所示。例如,活塞销、铆钉、螺栓、键等受力后主要产生剪切变形。

### 3. 扭转

这种变形由在杆件两端的一对大小相等、转向相反的力偶作用在垂直于杆件轴线的平面内,使杆件的任意两截面绕轴发生相对转动,如图0-2d)所示。例如,柴油机的曲轴、中间轴、机械设备中的转动轴等,主要产生扭转变形。

### 4. 弯曲

这种变形是由垂直于杆件轴线的力(通常称为横向力)或一对大小相等、方向相反的力偶作用于杆的纵向对称平面内,使原来为直线的轴线变成弯曲,如图0-2e)所示。例如,房屋的大梁、楼板、架空管道、单梁吊车的横梁等,在载荷作用下会产生弯曲变形。

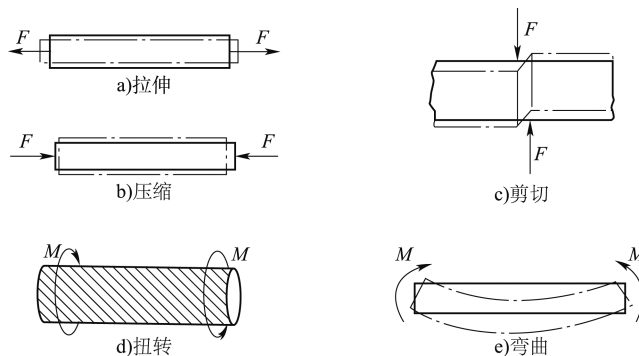


图0-2 杆件变形的的基本形式



## 必备知识 2 : 杆件轴向拉伸与压缩

### 要 点

在船用各种机器和设备中,受轴向拉伸或压缩的杆件是很常见的。如受轴向压缩的柴油机活塞杆和受轴向拉伸的气缸盖紧固螺栓,都是轴向拉伸与压缩的实例。轴向拉伸或轴向压缩的受力特点是:外力(或合外力)的作用线沿着杆件的轴线;变形特点是:杆件沿轴线方向伸长或缩短,而且变形前横截面是平面,变形后横截面仍保持为平面。

### 解 释

#### ● 杆件在拉压时的内力与应力

##### 1. 内力

构件受到外力作用后发生变形,其内部各点(宏观上的点)的相对位置发生变化,由此而产生因变形导致的内力(此为附加内力)。附加内力随外力的增大而增大,到达某一限度时就会引起构件破坏,因而它与构件的强度密切相关。

##### 2. 应力

应力是内力在截面某一点处的集度,即微小面积上的内力。应力可以分为正应力 $\sigma$ 和剪(切)应力 $\tau$ 。应力是一个矢量,具有大小和方向性。沿截面法向的分量称为正应力或法向应力,沿截面切向的分量称为剪应力或切应力。

对于拉、压等截面直杆,如活塞杆、连杆以及气缸盖螺栓,横截面上的应力可视为均匀分布,因此有垂直截面:

$$\sigma = \frac{P_N}{A}, \tau = 0 \quad (0-3)$$

式中: $P_N$ ——截面上的轴力;

$A$ ——截面面积。

对于和轴线倾斜角度为 $\alpha$ 的斜面:

$$\sigma_\alpha = \sigma \cos^2 \alpha, \tau_\alpha = \frac{1}{2} \sigma \sin(2\alpha) \quad (0-4)$$

式中: $\alpha$ ——斜面的坡角。

轮机工程人员需要特别注意的是,在计算连杆和气缸盖螺栓等构件的工作应力的时候,螺栓的受力是按照若干螺栓组理论上的平均受力来计算的,实际情况是各螺栓组的受力,因为装配(如液压拉伸器错误使用)等会分配不均匀。因此,个别螺栓的受力会大于

平均受力,极端的情况会发生某组螺栓因工作应力过大而发生断裂,有些“连杆伸腿”的严重故障就与此有关。另外,气缸盖螺栓因为防止气缸盖和缸套结合面的燃气泄漏,在装配时按照合适的预紧力上紧,工作时气缸盖螺栓的预紧力与燃气导致的拉力(轴力)叠加,如果装配时预紧力过大或柴油机严重超负荷,都会导致气缸盖螺栓的工作应力过大而产生危险。

## ● 杆件在拉压时的变形与应变

### 1. 杆件在拉压时的变形

由前述可知,直杆在沿轴线的外力作用下,将产生轴向伸长或缩短。试验表明:杆件受轴向拉伸时,杆沿纵向伸长,其横向尺寸减小;杆件受轴向压缩时,杆沿纵向缩短,其横向尺寸增大。杆件沿轴线方向的变形称为纵向变形,沿垂直于轴线方向的变形称为横向变形。如图 0-3 所示,设  $l$ 、 $d$  为直杆变形前的长度与直径, $l_1$ 、 $d_1$  为变形后的长度与直径,则纵向与横向变形分别为:

$$\Delta l = l_1 - l \quad (0-5)$$

$$\Delta d = d_1 - d \quad (0-6)$$

$\Delta l$  与  $\Delta d$  称为绝对变形,即总的伸长量或缩短量。

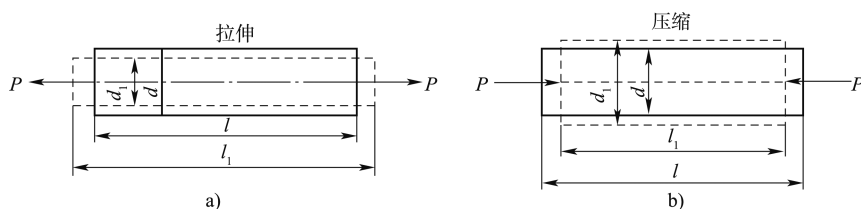


图 0-3 杆件在拉压时的变形

### 2. 杆件在拉压时的应变

绝对变形的大小与杆的原始尺寸  $l$ 、 $d$  有关。为了度量杆的变形程度,还需计算单位长度内的变形量。对于轴力为常量的等截面直杆,其变形处处相同。因此,可将  $\Delta l$  除以  $l$ ,  $\Delta d$  除以  $d$  表示单位长度变形量,即:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (0-7)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta d}{d} \quad (0-8)$$

$\varepsilon$  称为纵向线应变, $\varepsilon_1$  称为横向线应变。线应变是单位长度的变形,是无因次的量。拉伸时由于  $\Delta l > 0$ ,  $\Delta d < 0$ , 所以  $\varepsilon > 0$ ,  $\varepsilon_1 < 0$ ; 而压缩时则相反,  $\varepsilon < 0$ ,  $\varepsilon_1 > 0$ 。总之,纵向线应变  $\varepsilon$  与横向线应变  $\varepsilon_1$  的符号始终相反。

## ● 胡克定律

试验表明,当杆件上的拉力不超过某一限度时,杆件变形是弹性的,且其伸长量  $\Delta l$  与拉力  $P$  及杆件原长  $l$  成正比,与杆件的横截面面积  $A$  成反比,这一关系称为胡克定律,  $\Delta l \propto \frac{Pl}{A}$ , 引入比例常数  $E$ , 则:

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA} \quad (0-9)$$

式中,  $P$  是外力,  $N$  是内力,  $A$  是杆件截面面积,  $E$  是弹性模量。  $E$  与材料的性质有关, 单位和应力相同。  $E$  越大, 则杆件变形小, 因此它是衡量材料抵抗弹性变形能力的一个指标。 比如, 火车采用钢制车轮, 就是因为钢制车轮弹性模量大、弹性变形小, 这样变形而产生的阻力矩就较小且耗能较少; 反之, 自行车轮胎气不足的时候, 轮胎会因为较大的弹性变形而使阻力矩增大, 导致骑行困难。 柴油机缸盖采用紫铜垫片, 是因为紫铜有弹性模量小、塑性好、耐高温(紫铜的熔点是  $1083^{\circ}\text{C}$ ) 的特性。 纯铝的弹性模量比紫铜要小, 塑性也好, 但熔点为  $660^{\circ}\text{C}$ , 不适用于柴油机燃烧室的高温环境。

胡克定律分母中的  $EA$ , 代表材料抵抗拉伸(压缩)变形的能力, 称为杆件的抗拉(压)刚度。 大部分受力构件, 不仅要求其强度高、不易被破坏, 还要求杆件的刚度大、弹性变形小, 即构件的强度设计准则和构件变形必须满足刚度要求。

## ● 低碳钢拉伸时的力学性质

根据图线特点, 低碳钢在拉伸时可以分成 4 个阶段: 弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、局部变形阶段。 低碳钢拉伸图曲线如图 0-4 所示。

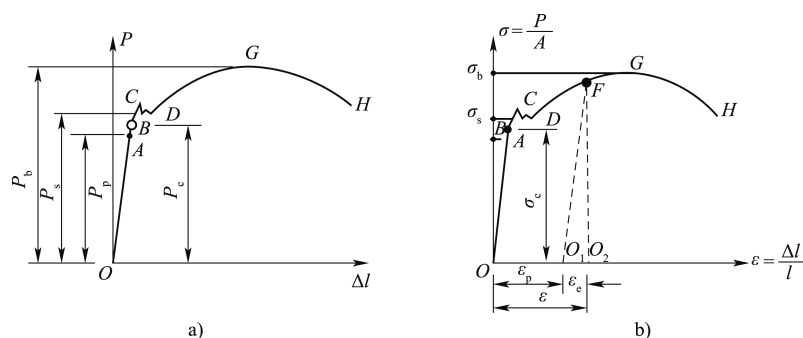


图 0-4 低碳钢拉伸图曲线( $P-\Delta l$  曲线和  $\sigma-\varepsilon$  曲线)

### 1. 弹性阶段

$\sigma-\varepsilon$  曲线的  $OB$  段为弹性变形阶段, 在这一阶段内试件的变形为弹性变形。 如将外力卸去, 试件的变形也随之全部消失, 这种变形即为弹性变形。 弹性变形阶段最高点  $B$  点所对应的应力值称为弹性极限, 用  $\sigma_e$  表示。

弹性阶段  $OB$  又可再划分为两段。  $OA$  段的线形为直线, 应力和应变成正比, 即满足胡克定律  $\sigma = E\varepsilon$ , 其最高点所对应的应力值称为比例极限, 用  $\sigma_p$  表示。  $OA$  直线的倾角为  $\alpha$ , 其斜率即为材料的弹性模量  $E$ 。  $AB$  段为微弯曲线, 这一阶段应力和应变不再保持比例关系, 胡克定律不再适用, 但仍是弹性变形。

弹性极限与比例极限虽有不同的物理含义, 但由于它们的数值十分接近, 在工程应用中, 一般认为弹性极限与比例极限大致相等。

### 2. 屈服阶段

当应力超过弹性极限后, 出现接近水平的波动线段  $CD$ 。 在此阶段, 应力变化不大但应变显著增加, 它标志着材料暂时失去了对变形的抵抗能力, 这种现象称为屈服。 屈服阶段的最低应力值称为材料的屈服极限, 记为  $\sigma_s$ 。 这一阶段材料弹性变形和塑性变形同时存在, 如

将外力卸去,试件的变形不能完全消失。

一般重要构件工作时不容许出现塑性变形,所以屈服极限  $\sigma_s$  是衡量塑性材料强度的重要指标之一。选用材料时,屈服极限并非越高越好。

### 3. 强化阶段

屈服阶段后, $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线出现上凸的曲线  $DG$  段。这表明,若要使材料继续变形,必须增加拉力,即材料又恢复了抵抗变形的能力,这种现象称为材料的强化, $DG$  段对应的过程称为材料的强化阶段。曲线最高点  $G$  所对应的应力是材料所能承受的最大应力,称为强度极限或抗拉强度,用  $\sigma_b$  表示。它是衡量材料强度的另一重要指标。

将试件拉到超过屈服点后卸载,然后重新加载时,材料的比例极限有所提高,而塑性变形能力减弱,这种现象称为冷作硬化(加工硬化)。这在工程中常常用到,如起重用的钢索和建筑用的钢筋,常用冷作硬化工艺提高其强度。

### 4. 局部变形阶段

$\sigma$ - $\varepsilon$  曲线的  $GH$  段为局部变形阶段。此阶段曲线从最高点下降,试件较薄弱的某一横截面及其附近出现局部收缩即缩颈的现象,如图 0-5 所示。在试件继续伸长的过程中,由于缩颈部分的横截面积急剧缩小,试件继续伸长所需要的拉力也迅速减小,于是按初始横截面面积计算的名义应力随之减小。当缩颈处的横截面收缩到某一程度时,试件便发生断裂。

试件被拉断后,弹性变形消失,塑性变形依然保留。工程中用试件拉断后残留的塑性变形来表示材料的塑性性能。常用的塑性指标有延伸率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$ 。前者表示试件拉断后标距范围内平均塑性变形百分率,即:



图 0-5 缩颈现象

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \times 100\% \quad (0-10)$$

式中: $l_1$ ——图 0-6 所示试样拉断后标距的长度;

$l$ ——标距原长。

$\delta$  反映了材料在破坏时所发生的最大塑性变形程度。工程上将  $\delta > 5\%$  的材料称为塑性材料,如低碳钢、黄铜、铝合金等;将  $\delta < 5\%$  的材料称为脆性材料,如铸铁、陶瓷、石材等。低碳钢是典型的塑性材料,其延伸率  $\delta$  为  $20\% \sim 30\%$ 。

另一个塑性指标断面收缩率  $\psi$  是指试件断口处横截面面积的塑性收缩百分率,即:

$$\psi = \frac{A - A_1}{A} \times 100\% \quad (0-11)$$

式中: $A$ ——试件原横截面面积;

$A_1$ ——图 0-6 所示断裂后缩颈处的最小横截面面积。

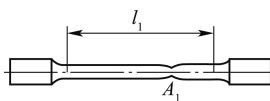


图 0-6 试样拉断后标距的长度用  $\sigma_{0.2}$  表示。

塑性材料拉伸时都具有较高的伸长率,但其中有些材料没有明显的屈服阶段。对于没有明显屈服点的塑性材料,工程中通常以产生  $0.2\%$  塑性应变时所对应的应力作为名义屈服极限,

铸铁是典型的脆性材料,拉伸断裂时的强度极限  $\sigma_b$  是衡量其强度的唯一指标。铸铁受拉伸时的  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线特点是没有明显的直线部分,既无屈服阶段,亦无颈缩断裂阶段。在拉

力较小的情况下试样即发生断裂,断裂时应变通常只有 0.4% ~ 0.5%,断口垂直于试件轴线(扭曲断裂时,断口与试件轴线大致成 45°)。由于铸铁的抗拉强度较差,一般不宜作为承受拉力的构件。

## ● 铸铁压缩时的力学性质

由于低碳钢压缩时的比例极限和屈服极限与拉伸时相同,而其抗压强度极限难以测出,所以低碳钢压缩时相应的力学性能不再单独试验测得。

铸铁压缩时的抗压强度比抗拉强度高出 4 ~ 5 倍。铸铁试件受压缩发生断裂时,断裂面与轴线大致成 45° ~ 55° 的倾角,这表明铸铁试件受压时断裂由最大切应力所致。对于其他脆性材料如石材、混凝土等,其抗压能力也显著高于抗拉能力。因此,工程上常用脆性材料作为承压构件,如船机机架常采用灰铸铁材料。

## ● 杆件在拉压时的强度

材料丧失工作能力时的应力,称为极限应力或危险应力。由上述可知,对塑性材料,当应力达到屈服极限时,构件会产生过大的塑性变形,将影响构件的正常工作,所以屈服极限  $\sigma_s$  是塑性材料的危险应力;对脆性材料,在变形很小时就断裂,所以强度极限  $\sigma_b$  是脆性材料的危险应力。危险应力用  $\sigma^0$  表示。显然,构件工作时的最大应力必须低于危险应力。但这还不够,因为构件的实际工作情况与设计时所设想的条件难以完全符合,而且也不可能确切地估计这种差异;另一方面构件也必须有足够的强度储备。因此,令:

$$[\sigma] = \frac{\sigma^0}{n} \quad (0-12)$$

式中:[ $\sigma$ ]——许用应力,是构件安全工作时所允许的最大应力;

$n$ ——安全系数, $n > 1$ 。

安全系数取得越小,则许用应力越接近于危险应力,且用料少,但构件将偏于危险;反之,如果安全系数选得过大,构件则偏于安全,但用料多。所以安全系数的选择是安全与经济矛盾的关键问题,也是一个复杂的实际问题,必须全面地考虑影响构件强度的各个因素,如材料的均匀程度、载荷确定和应力计算的精确性,构件的工作条件和使用年限以及发生破坏时后果的严重程度等。在实际应用中,安全系数的选择可参考有关的设计规范,对一般机械在常温、静载下,塑性材料安全系数  $n = 1.5 \sim 2.0$ ,脆性材料由于均匀性差,且突然破坏有更大的危险性,所以取  $n = 2 \sim 5$ 。

为了保证杆件在外力作用下安全正常地工作,必须使杆件中最大工作应力  $\sigma_{\max}$  不超过材料的许用应力,即:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A} \leq [\sigma] \quad (0-13)$$

上式称为杆件拉压时的强度条件,运用强度条件可以解决强度校核、选择截面、确定许用载荷 3 方面的问题。上式保证了杆件的安全程度。有时杆件的强度条件虽然足够,但因变形(仍是弹性的)过大,刚性不足,以致不能使用,因此,为了使构件能够既经济又安全,还要适用,必须限制构件的变形,即满足变形不致过大的刚度条件。

### ● 强度失效和失效力

如果构件发生断裂,将完全丧失正常功能,这是强度失效最明显的形式。如果构件没有发生断裂而是产生明显的塑性变形,这在很多工程中都是不容许的。因此,当构件发生屈服而产生明显塑性变形,也是失效。根据拉伸试验过程中呈现的现象,强度失效的形式可以归纳为:塑性材料的强度失效形式是屈服和断裂,一般首先考虑屈服;脆性材料的强度失效形式是断裂。因此,塑性材料的强度失效力是屈服极限 $\sigma_s$ (或条件屈服极限 $\sigma_{0.2}$ )、强度极限或抗拉强度 $\sigma_b$ ;脆性材料的强度失效力是强度极限或抗拉强度 $\sigma_b$ 。



## 必备知识 3 : 杆件剪切与挤压

### 要 点

剪切变形是杆件的基本变形形式之一,受剪构件除了承受剪切外,挤压是相伴随而存在的,两者都会使构件发生破坏。

### 解 释

#### ● 杆件在剪切时的内力与应力

图 0-7 表示了连接两钢板的精制螺栓,两块钢板在力  $P$  作用下有相对滑移的趋势,而螺栓限制其滑移,因此螺栓就受剪切。用截面法将螺栓沿剪切面切开,研究任一段的平衡,如图 0-7b) 所示,在剪切面上存在着与外力大小相等、方向相反的沿剪切面的内力,称为剪力,用  $Q$  表示。由平衡条件  $\sum A_y = 0, Q - P = 0$ , 得  $Q = P$ 。

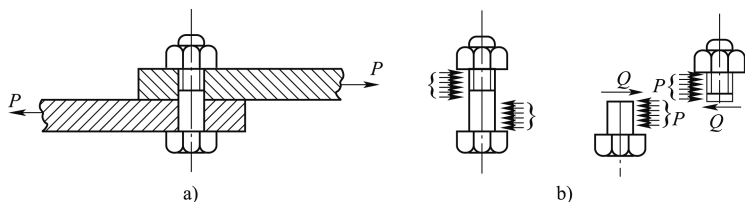


图 0-7 杆件在剪切时的内力与应力

由于在构件剪切面上,剪力的分布情况比较复杂,在实用上假定剪力  $Q$  均匀分布在剪切面上。由此得剪力计算公式为:

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (0-14)$$

式中:  $\tau$ ——剪应力, Pa;

$Q$ ——剪切面上的剪力, N;

$A$ ——剪切面面积,  $m^2$ 。

#### ● 杆件在剪切时的变形与应变

为了分析剪切变形,在构件的受剪部位(图 0-8),围绕  $A$  点取一微元体,如图 0-8a) 所示。剪切变形时,截面发生相对滑动,致使微元体变成平行六面体,如图 0-8b) 细实线所示。图中线段  $ee'$  (或  $ff'$ ) 为平行于外力的面  $efhg$  相对于  $abdc$  的滑移量,称为绝对剪切变形。相

对剪切变形为:

$$\frac{e e'}{dx} = \tan\gamma \approx \gamma \quad (0-15)$$

式中: $\gamma$ ——矩形直角的微小改变量,如图 0-8b)所示,称为剪应变或角应变。

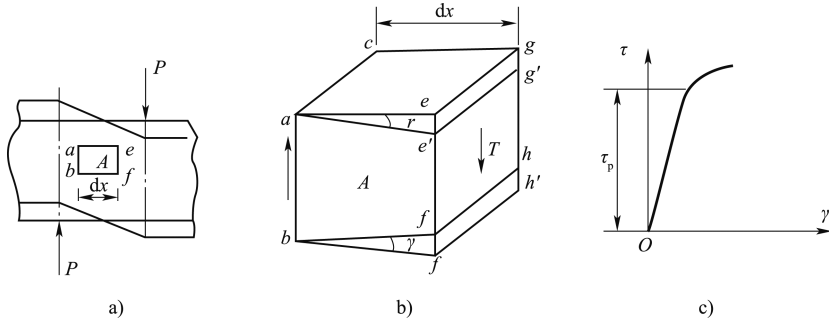


图 0-8 构件的受剪部位

试验证明:杆件扭转时,横截面剪应力与剪应变之间也存在一定的关系:当剪应力不超过材料的剪切比例极限时,剪应力与剪应变有线性关系,这一关系称为剪切胡克定理:

$$\tau = G\gamma \quad (0-16)$$

式中: $G$ ——材料的剪切弹性模量,是表示材料抵抗剪切变形,它的量纲与应力 $\tau$ 相同。

当剪应力不变时,剪切弹性模量 $G$ 值越大,剪应变 $\gamma$ 就越小。

### ● 构件的剪切强度

如图 0-8 所示,为了保证螺栓工作时安全可靠,要求螺栓在工作时受剪面上的剪应力不超过材料的许用剪应力 $[\tau]$ ,因此,其剪切强度条件为:

$$\tau = \frac{Q}{A} \leq [\tau] \quad (0-17)$$

对许用剪应力 $[\tau]$ 的确定,可以利用剪切试件(与构件实际受力情况相似),测出破坏载荷 $P_b$ ,得到极限剪力 $Q_b$ ,再由式(1-17)计算出剪切极限应力 $\tau_b$ ,然后除以大于 1 的安全系数,即可得构件的许用剪应力 $[\tau]$ 。对于钢质构件,许用剪应力 $[\tau]$ 与许用拉应力 $[\sigma]$ 的关系为:

$$\begin{aligned} [\tau] &= (0.8 \sim 1.0)[\sigma] \quad (\text{适用脆性材料}) \\ [\tau] &= (0.6 \sim 1.0)[\sigma] \quad (\text{适用塑性材料}) \end{aligned} \quad (0-18)$$

### ● 构件的挤压强度

机械中的连接件,承受剪切作用的同时,在传递力的接触面上,由于局部承受较大压力,而出现塑性变形。图 0-7a) 所示的螺栓连接,钢板的圆孔可能挤压成长圆孔,或螺栓的侧表面被压溃。这种在接触表面互相压紧而产生局部变形的现象,称为挤压。作用于接触面上的压力,称为挤压力,用 $P_j$ 表示。由挤压作用引起的应力叫作挤压应力,用 $\sigma_j$ 表示。

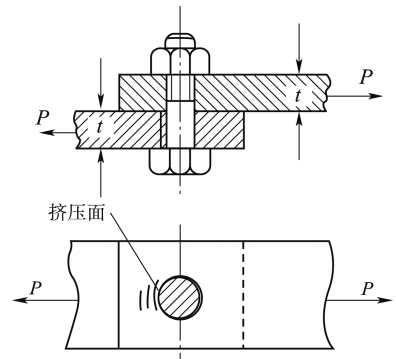


图 0-9 钢板的圆孔挤压成长圆孔



## 必备知识 4 : 机械振动

### 要 点

机械振动是指机器或结构物在其静平衡位置附近作往复性的运动。机械振动可以从不同的角度来进行分类,通常有4种分类方法,即按振动产生的原因分类(分为自由振动、受迫振动和自激振动)、按振动的规律分类(分为简谐振动、非简谐振动和随机振动)、按振动的位移特征分类(分为纵向振动、横向振动和扭转振动)和按振动系统的自由度多少分类(分为单自由度系统振动和多自由度系统振动)。

### 解 释

#### ● 机械振动产生的原因

引起机械振动的外因可能是:

- (1) 旋转构件的不平衡和负载分布不均匀;
- (2) 安装精度不够,造成物体之间的间隙过大;
- (3) 物体表面质量和润滑不够理想,因而造成滑动或滚动不平衡。

造成机械振动的内因可能是:

- (1) 振动物体的质量分布不均匀;
- (2) 结构的刚度不够;
- (3) 物体本身的材质。

#### ● 机械振动的危害

在许多情况下,振动的存在是有害的,主要体现在:

(1) 耗能。振动要消耗能量以维持其往复性的运动,增加额外的功率损耗,浪费能源。

(2) 破坏。振动产生有损于机械或结构的动载荷,影响机械设备或结构物的工作性能,缩短设备使用寿命,严重时会使零件失效甚至破坏而造成事故。

(3) 噪声。振动会对环境造成噪声污染,破坏其他设备、仪表的正常工作;降低控制、监测系统的精度;恶化工作条件,降低工作效率,影响人-机系统的总体性能。

此外,作为运输动力的内燃机,其振动将损害船舶、汽车的舒适性;振动诱发的噪声也会破坏乘客的安静环境和某些特殊军事设备所需的隐蔽性。

## ● 机械振动的利用与消除

一方面,振动的存在是有害的,因此,对大多数机械设备来说,应尽可能避免振动或将其振动量控制在允许的范围内。但是,从另一方面也可以利用振动原理制造大量的有利于生产发展的振动设备,如振动筛、振动打桩机、混凝土振捣器等,这里的振动则是有益的。研究振动的目的就是认识和掌握振动的规律,充分利用振动有益的一面,抑制或消除不利的一面。

机械振动削弱与消除的途径主要有削弱振动源、避免共振、安装调频飞轮等。

## ● 机械振动的分类

### 1. 按振动产生的原因分类

(1)自由振动:当系统受到暂时干扰、系统的平衡状态遭到破坏时,仅靠其弹性恢复力来维持的振动,例如单摆的摆球偏离平衡位置后的振动。

(2)受迫振动:系统在持续的外界干扰力的作用下,被迫产生的振动,例如电动机转子由于不平衡运转时引起的振动。

(3)自激振动:由于系统具有非振荡性能源和反馈特性,从而引起的一种稳定的周期性的振动,例如机床切削时的高频振动。

### 2. 按振动的规律分类

(1)简谐振动:能用一项正弦或余弦函数来描述其运动规律的周期性振动。

(2)非简谐振动:不能用一项正弦或余弦函数来描述其运动规律的周期性振动。

(3)随机振动:不能用简单函数或简单函数的组合来描述其运动规律,只能用统计的方法来研究的非周期性振动。

### 3. 按振动的位移特征分类

(1)纵向振动:振动体上的质点只作沿轴线方向的振动。

(2)横向振动:振动体上的质点只作垂直于轴线方向的振动。

(3)扭转振动:振动体上的质点只作绕轴线的振动。

### 4. 按振动系统的自由度分类

(1)单自由度系统振动:确定系统在振动过程中任何瞬间的几何位置只需要一个独立坐标的振动。

(2)多自由度系统振动:确定系统在振动过程中任何瞬间的几何位置需要多个独立坐标的振动。

## 相关知识

## ● 机械振动的基本概念

(1)振幅:振体偏离平衡位置的最大距离称为振幅,它反映了振体的振动范围和强弱,单位为 mm。

(2)频率:振体在每秒内振动的次数称为频率,它反映了振体振动的快慢,用符号  $f$  表

示,单位为 Hz。

(3) 周期:振体每振动一次(重复一次运动状态)所需的时间称为周期,它同样反映了振动的快慢,用符号  $T$  表示,单位为 s。

频率和周期互为倒数关系,即:

$$T = 1/f \quad (0-19)$$

(4) 圆频率:振动的圆频率是指振体在  $2\pi$  秒内振动的次数,用符号  $\omega$  表示,单位为 rad/s。

圆频率与频率的关系为:

$$\omega = 2\pi f \quad (0-20)$$



## 必备知识 5 : 金属材料的机械性能

### 要 点

金属材料的机械性能是其在外力作用下所表现出来的力学特性,主要性能指标有刚度、塑性、弹性、强度、硬度、冲击韧性、疲劳强度和高温强度等。金属材料在外力作用下的基本力学行为是变形和断裂,其中变形包括弹性变形和塑性变形,断裂包括塑性(韧性)断裂和脆性断裂。金属材料能否满足零构件工作条件下的应力要求,取决于金属材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力,取决于金属材料本身的机械性能或力学性能。

### 解 释

#### ● 刚度

刚度是指材料或结构在受力时抵抗弹性变形的能力,衡量材料刚度的指标是弹性模量  $E$ ,其值大小反映了金属材料弹性变形的难易程度。

在材料力学中,胡克定律分母中的  $EA$ ,代表材料抵抗拉伸(压缩)变形的能力,称为杆件的抗拉(压)刚度。弹性模量  $E$  与横梁截面惯性矩  $I$  的乘积  $EI$ ,表示横梁的抗弯刚度,比如横梁的高度往往大于宽度就是为了获得较大的惯性矩以提高横梁的刚度。 $E$  越大,材料刚度越大,即在一定的应力作用下产生的弹性变形越小。一般机器零件大多在弹性变形状态下工作,因此应具有一定的刚度。工程上将构件产生弹性变形的难易程度称为构件刚度, $E$  是决定构件刚度的材料性能。依胡克定律  $\Delta l = \frac{Nl}{EA}$  可知,构件刚度除与材料刚度有关外,还与构件截面大小、形状有关。

#### ● 塑性

试验指出,当载荷超过一定限度时,在载荷去除后,变形只能部分复原,而残留一部分变形不能消失,材料的这种性质称为塑性;不能复原而残留下来的变形称为塑性变形。衡量金属材料塑性的指标有延伸率和断面收缩率。

#### ● 强度

强度是金属材料在外力作用下抵抗产生塑性变形和断裂的能力。按加载方式的不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。通常以抗拉强度作为基本的强度

指标,它是通过拉伸试验测得的。零件承受拉力时的强度指标有屈服强度和抗拉强度。

### 1. 屈服强度

屈服强度又称屈服极限,用表示 $\sigma_s$ (单位:MPa)。屈服强度是材料抵抗微量塑性变形的能力,也就是材料在外力 $P_s$ 作用下刚刚开始产生塑性变形时的应力。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{A_0} \quad (0-21)$$

式中: $A_0$ ——受力材料的原始横截面面积, $m^2$ ;

$P_s$ ——材料产生屈服时的外力,N。

在图0-4的 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线上,当应力达到 $s$ 点时,应力即使不再增加,试样的塑性变形也会继续增大,使曲线产生微小波动的水平段,此种现象称为屈服。不同材料的 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线可有不同的屈服情况。除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有屈服现象外,大多数金属合金都没有屈服点和屈服现象。因此,工程上规定将产生0.2%残余伸长的应力值作为屈服强度,用 $\sigma_{0.2}$ 来表示。 $\sigma_s$ 是具有屈服现象的材料特有的强度指标。所以, $\sigma_{0.2}$ 和 $\sigma_s$ 均是表征金属产生微量塑性变形的抗力,是塑性材料机械设计和选材时的主要依据。

### 2. 抗拉强度

抗拉强度又称强度极限,用 $\sigma_b$ (单位:MPa)表示。抗拉强度是金属材料抵抗断裂的能力,也就是材料从开始受力到断裂为止时所能承受的最大应力值,是 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线上 $G$ 点对应的应力[图0-4b)]。 $\sigma_b$ 由下式求出:

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_0} \quad (0-22)$$

式中: $P_b$ ——试样在断裂时所承受的最大拉力,N。

屈强比是屈服强度与抗拉强度的比值,即 $\sigma_s/\sigma_b$ ,是工程上常用的参数。材料的屈强比越小,表示相同 $\sigma_b$ 时材料的 $\sigma_s$ 较小,零件的储备强度大,工作可靠性大,因而可避免由于超载而突然断裂的危险,然而材料潜力未能充分发挥。一般制造弹性零件的材料应具有较高的屈强比,通常的 $\sigma_s/\sigma_b \geq 0.8$ 。

## ● 硬度

硬度是指金属材料抵抗比它更硬的物体压入其表面的能力,即抵抗局部塑性变形的能力。许多机械零件根据工作条件的不同,常要求硬度在某一规定的范围内,这样才能保证高的强度、好的耐磨性和长的使用寿命。硬度也是金属材料的重要力学性能之一。

常用的硬度指标有布氏硬度 HB、洛氏硬度 HR 和维氏硬度 HV。布氏硬度压痕大,不适于测量成品表面硬度和硬薄件,主要用来测定灰铸铁、有色金属以及退火、正火和调质处理的钢材等。洛氏硬度试验法测量范围广、试件表面压痕小,可直接测量成品或较薄的工件,被广泛用于生产和科研中。维氏硬度试验法的测量精度高、误差较小,可以用来测量极薄试件以及金属镀层、化学热处理后的表面硬度,但生产率不如洛氏硬度试验法高,因此不宜用于成批生产的常规试验。

## ● 脆性

脆性是指材料在外力作用下(如拉伸、冲击等)仅产生很小的变形即断裂破坏的性质。与韧性相反,直到断裂前只出现很小的弹性变形而不出现塑性变形。

## ● 延展性

延展性是物质的一种机械性质,表示材料在受力而产生破裂之前其塑性变形的能力。延展性是延性、展性两个概念相近的机械性质的合称。材料在外力作用下能延伸成细丝而不断裂的性质叫作延性,在外力(锤击或轧制)作用下而不破裂的性质叫作展性。显然,材料塑性好,则其延展性也好。常见金属及许多合金均有延展性。

## ● 韧性与冲击韧性

材料在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力,称为韧性。塑性好的材料一般韧性也较好。一般材料在受到冲击的时候吸收能量的能力,称为冲击韧性。冲击韧性是金属材料抵抗冲击载荷的能力,用  $\alpha_k$  (单位:  $J/cm^2$ ) 表示。

冲击韧性  $\alpha_k$  值越大,表明材料韧性越好。 $\alpha_k$  值的大小与试验温度有关。材料的力学性能会随着外界条件的变化而变化,例如温度、加载速度等都会对材料的力学性能产生一定影响。有些材料在室温(20℃)时无明显脆性,而在低温下其冲击韧性急剧下降可能导致脆性断裂。船舶经常航行在大风浪中,船体材料需要具有较高的冲击韧性,而无限航区船舶可能在冬季航行到寒冷地带,其船体钢板不但需要具有较高的冲击韧性,而且材料的低温脆性转变温度指标必须要足够低(比如 -40℃ 或者 -60℃)才能保证安全。

在生产实践中,绝大多数在动载荷下工作的零件与构件都是在小能量多次重复冲击载荷下工作,很少因一次超载冲击而破坏,所用材料的冲击韧性应以最小能量多次冲击试验来测定。试验证明,材料在小能量多次重复冲击时的冲击抗力主要取决于材料的强度。

## ● 疲劳强度

零件在大小和方向周期变化的交变载荷作用下,在小于抗拉强度甚至屈服强度的情况下发生突然断裂,这种现象称为疲劳断裂。材料在无限次交变载荷作用下不致引起破坏的最大应力,称为疲劳强度。而在实际工作中材料的材质不可能绝对均匀,规定材料在规定次数(一般钢铁材料取  $10^7$  次,有色金属及其合金取  $10^8$  次)的交变载荷作用下不致引起断裂的最大应力为疲劳强度。疲劳强度又称疲劳极限,用  $\sigma_{-1}$  来表示。一般钢铁材料的疲劳强度为抗拉强度的一半,非金属材料疲劳极限低于金属材料。

## ● 高温强度

高温强度又称热强度,是指材料结构在热环境下,承受载荷和耐受热环境的能力,它是应力、应变、温度和时间综合作用的反映。其指标有蠕变极限和持久强度。

### 1. 蠕变极限

蠕变极限又称蠕变强度,是金属材料长期在高温和应力作用下抵抗塑性变形的能力,用  $\sigma_{\delta}^T/t$  表示,单位为 MPa。意思是在一定的温度  $T$  下,一定的时间  $t$  内,产生一定塑性变形量  $\delta$  时所能承受的最大应力。

### 2. 持久强度

持久强度是金属材料长期在高温和应力作用下抵抗断裂的能力,用  $\sigma_r^T$  表示,单位为 MPa。意思是在一定的温度  $T$  下,工作一定的时间  $t$  后产生断裂的应力。