

责任编辑：石进京
封面设计：唐浩设计

智能制造基础技术系列教材

机械设计基础

机械制造基础

AutoCAD 应用教程

模具数字化设计与制造

Creo项目化教程

钳工技能实训

冷冲压工艺与模具设计

冲压成形工艺及模具设计

电子产品生产工艺

3D打印技术

数控设备维护与装调

数控机床故障诊断与维修

数控加工工艺

数控加工编程

制造执行系统（MES）

可编程控制技术

人工智能控制技术

人工智能基础及应用

变频器原理与应用技术

变频与伺服控制技术

传感器与自动检测系统设计

金属材料焊接工艺制定与评定

工程材料及热处理

智能制造基础技术系列教材

工程材料及热处理

主编◎徐 勇 戴乃昌 孙 伟

航空工业出版社

智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

工程材料及热处理

主编◎徐 勇 戴乃昌 孙 伟

GONGCHENG CAILIAO JI RECHULI

中航出版传媒有限责任公司
CHINA AVIATION PUBLISHING & MEDIA CO., LTD.
www.aviationnow.com.cn



定价：56.00元

航空工业出版社

智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

工程材料及热处理

主编◎徐 勇 戴乃昌 孙 伟

GONGCHENG CAILIAO JI RECHULI

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书紧密结合高等职业教育的办学特点，通过“项目引领，任务驱动”的教学模式，在学习过程中强调以实际项目为核心，通过具体任务来激发学习者主动学习和实践探索的热情，引导学习者在实践中探索理论知识，增强综合技能，同时培养学习者解决问题、团队合作和自主学习的能力，为将来的职业发展打下坚实基础。本书可供应用型本科、高职高专院校的机械类、热加工类、近机类专业教学使用，也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

工程材料及热处理 / 徐勇，戴乃昌，孙伟主编.

北京：航空工业出版社，2024. 10. -- ISBN 978-7-5165-3892-0

I. TB3; TG15

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 202432VJ89 号

工程材料及热处理

Gongcheng Cailiao ji Rechuli

航空工业出版社出版发行

（北京市朝阳区京顺路 5 号曙光大厦 C 座四层 100028）

发行部电话：010-85672666 010-85672683 读者服务热线：010-85672635

中煤（北京）印务有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2024 年 10 月第 1 版

2024 年 10 月第 1 次印刷

开本：889×1194 1/16

字数：542 千字

印张：18.5

定价：56.00 元

在线课程学习指南

本书配套在线课程“工程材料及热处理”，读者可通过超星平台和学习通 App 在线学习。

一、加入课程

进入超星官网（www.chaoxing.com），登录账号（新用户请先注册），进入个人空间，单击“输入邀请码”，输入“46942858”，加入该课程。也可以使用学习通 App 扫描二维码加入课程。

请输入邀请码

请输入课程、应用、小组、直播、云盘、教研室邀请码

取消确定

加入课程

工程材料及热处理
徐勇

加入课程



二、在线学习

单击添加的课程，进入学习页面，选择对应栏目开始学习。

泛雅

课程门户 >

工程材料及热处理

任务

章节

讨论

作业

考试

资料

错题集

学习记录

知识图谱

已完成任务点: 0/0

目录

1 工程材料的性能

1.1 金属材料的力学性能

1.1.1 强度与塑性

1.1.2 弹性与刚度

1.1.3 硬度与韧性

1.1.4 断裂韧性和金属疲劳

1.2 材料的物理化学性能

1.2.1 物理性能

1.2.2 化学性能

1.3 材料的工艺性能

前言

以习近平同志为核心的党中央高度重视教材工作，从治国理政的战略高度，强调教材建设体现国家意志，是国家事权。加强教材建设和管理，是推进实施科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略的基础性、战略性工程。

党的二十大报告指出：“培养造就大批德才兼备的高素质人才，是国家和民族长远发展大计”“努力培养造就更多大师、战略科学家、一流科技领军人才和创新团队、青年科技人才、卓越工程师、大国工匠、高技能人才”。编者结合党的二十大报告精神和教育部打造“金课”及高等职业教育课程改革和教材建设的要求，依据高等职业教育人才培养目标和课程标准，编写了《工程材料及热处理》这本教材。

本书共安排了十个项目，包括测定材料性能、观察金属的晶体结构、识读铁碳合金相图、制订钢的热处理工艺、识别工业用钢、识别工业铸铁、认识非铁合金及粉末冶金、认识非金属材料、认识新型材料和选用工程材料，每个项目下面又安排若干任务，项目结束之后安排了项目检测等内容，考察学习者的实际学习效果。

本书在编写过程中紧密结合高等职业教育的办学特点和学习目标，强调实践性、应用性和创新性，降低理论深度，坚持理论知识以应用为目的，以必需、够用为度，注意内容的精选和创新，突出实践应用，拓宽知识领域，重在能力培养。

温州职业技术学院徐勇副教授编写项目一、二、三、四、五和全部项目检测及参考答案，北京劳动保障职业学院王长全教授编写项目六，温州职业技术学院戴乃昌副教授编写项目七，浙江伯特利科技股份有限公司吴寿敬高级工程师编写项目八，温州理工学院孙伟副教授编写项目九，浙江省泵阀产品质量检验中心孙丰位工程师编写项目十，无锡职业技术大学张宁菊教授和常熟理工学院封士彩教授对本书的编写提出了宝贵的建议。全书由徐勇副教授、戴乃昌副教授、孙伟副教授担任主编，王长全教授、吴寿敬高级工程师、孙丰位工程师担任副主编，南京工业职业技术大学丁继斌教授担任主审。

本书在编写过程中，得到了江苏师范大学、常熟理工学院和兰州理工大学有关同行的大力支持和帮助，在此一并感谢。

为便于教学，本书配有电子课件教案、试卷及参考答案、习题等可供参考，有需要者可致电教学助手 13810412048 或发邮件至 2393867076@qq.com。由于编者知识水平和教学经验所限，书中存在的疏漏和不妥之处，敬请读者和专家批评指正。

编者

2024 年 5 月

目录

项目一 测定材料性能

任务一 认识材料	1
一、材料的发展史	1
二、材料的分类	2
任务二 材料的力学性能	2
一、强度与塑性	2
二、弹性与刚度	7
三、硬度	8
四、冲击韧性	11
五、金属的疲劳	13
任务三 材料的物理和化学性能	16
一、材料的物理性能	16
二、材料的化学性能	17
任务四 材料的工艺性能	17
一、铸造工艺性能	17
二、锻造工艺性能	18
三、焊接工艺性能	18
四、切削加工性能	18
项目检测	18

项目二 观察金属的晶体结构

任务一 金属的晶体结构	24
一、晶体与非晶体	24
二、晶体结构的基本概念	25
三、常见的晶格类型	25
四、金属的实际晶体结构	26
五、晶体缺陷	27
任务二 纯金属的结晶与同素异构转变	29
一、纯金属的结晶条件	29
二、纯金属的结晶过程及其规律	29

三、晶粒大小及其控制	30
四、金属的同素异构转变	32
任务三 合金与合金的相结构	33
一、合金的概念	33
二、合金的相结构	33
任务四 二元合金相图	35
一、匀晶相图	35
二、共晶相图	36
三、共析相图	39
四、合金的力学性能与相图的关系	39
五、合金工艺性能与相图的关系	40
项目检测	41

项目三 识读铁碳合金相图

任务一 铁碳合金的基本组织	48
一、铁素体	48
二、奥氏体	49
三、渗碳体	49
四、珠光体	50
五、莱氏体	51
任务二 铁碳合金相图	51
一、铁碳合金相图的含义	51
二、铁碳合金相图分析	53
任务三 铁碳合金的结晶过程	54
一、铁碳合金的分类	54
二、典型铁碳合金的结晶过程	54
任务四 铁碳合金相图的应用	57
一、碳含量对铁碳合金组织和性能的影响	57
二、铁碳合金相图在多个方面的应用	59
三、铁碳合金相图的局限性	60
项目检测	60

项目四 制订钢的热处理工艺

任务一 钢的热处理原理	66
一、钢的热处理概述	66
二、钢在加热时的组织转变	67

三、钢在冷却时的组织转变	70
四、过冷奥氏体的连续冷却转变	77
任务二 钢的退火与正火	79
一、钢的退火	79
二、钢的正火	82
任务三 钢的淬火	83
一、淬火加热温度	83
二、淬火加热时间	84
三、淬火冷却介质	85
四、淬火方法	86
五、钢的淬透性	87
任务四 钢的回火	90
一、钢的回火的概念和目的	90
二、淬火钢回火时组织的转变	90
三、回火的种类	92
四、回火脆性	93
任务五 钢的表面热处理	94
一、钢的表面淬火	94
二、钢的化学热处理	95
任务六 钢的其他热处理	97
一、可控气氛热处理	97
二、钢的真空热处理	98
三、钢的形变热处理	98
四、钢的热喷涂	100
任务七 热处理的工艺性	100
项目检测	102

项目五 识别工业用钢

任务一 工业用钢的分类和牌号	112
一、碳素钢的分类和牌号	112
二、合金钢的分类和牌号	118
任务二 化学成分对钢性能的影响	120
一、碳的影响	120
二、锰的影响	121
三、硅的影响	121
四、硫的影响	121
五、磷的影响	122
六、氧的影响	122

七、氮的影响	122
八、氢的影响	122
任务三 合金元素在钢中的作用	122
一、形成合金铁素体	122
二、形成合金碳化物	123
三、合金元素对 Fe-Fe ₃ C 相图的影响	124
四、合金元素对钢的热处理的影响	125
五、合金元素对钢力学性能的影响	128
任务四 合金结构钢	129
一、低合金结构钢	129
二、合金渗碳钢	132
三、合金调质钢	135
四、合金弹簧钢	138
五、滚动轴承钢	139
任务五 合金工具钢	141
一、低合金刀具钢	141
二、高速工具钢	142
三、合金模具钢	145
四、合金量具钢	149
任务六 特殊性能钢	149
一、不锈钢	149
二、耐热钢	152
三、耐磨钢	153
项目检测	154

项目六 识别工业铸铁

任务一 铸铁的石墨化	161
一、铁碳合金双重相图	161
二、铸铁的石墨化过程	162
三、影响铸铁石墨化的因素	163
任务二 铸铁的分类	164
一、根据碳的存在形式分类	164
二、根据石墨的形态分类	164
任务三 常用铸铁	165
一、灰铸铁	165
二、可锻铸铁	168
三、球墨铸铁	170
四、蠕墨铸铁	173

任务四 合金铸铁	174
一、耐磨铸铁	175
二、耐热铸铁	175
三、耐蚀铸铁	176
项目检测	176

项目七 认识非铁合金及粉末冶金

任务一 铝及铝合金	181
一、工业纯铝	181
二、铝合金	182
任务二 铜及铜合金	189
一、工业纯铜	189
二、铜合金	189
三、铜合金的发展趋势	194
任务三 钛及钛合金	196
一、纯钛	196
二、钛合金	196
任务四 轴承合金	197
一、滑动轴承概述	197
二、对轴承合金的性能和组织要求	198
三、常用轴承合金	199
任务五 粉末冶金	204
一、金属陶瓷硬质合金	205
二、碳化钛基类硬质合金	207
三、钢结硬质合金	207
项目检测	208

项目八 认识非金属材料

任务一 高分子材料	214
一、塑料	215
二、橡胶	217
三、纤维	219
四、胶黏剂	221
五、涂料	225
任务二 陶瓷材料	228
一、陶瓷概述	228

二、陶瓷材料的分类	228
三、陶瓷材料的性能特点	228
四、常用的工程陶瓷	229
任务三 复合材料	232
一、复合材料的概念	232
二、复合材料的分类	233
三、复合材料的特点	233
四、复合材料的应用领域	234
项目检测	235

项目九 认识新型材料

任务一 形状记忆合金	240
一、形状记忆效应	240
二、形状记忆效应的分类	241
三、形状记忆效应机理	241
四、SMA 的种类及性能	243
五、形状记忆合金的应用	245
任务二 非晶态合金	246
一、非晶态合金简述	246
二、非晶态合金的结构及特性	246
三、典型的非晶态合金	247
四、非晶态合金的应用	247
任务三 超导材料	248
一、超导材料的基本性质	248
二、超导体的临界参数	249
三、超导材料的分类	250
四、超导材料的应用	250
任务四 储氢合金	250
一、储氢技术原理	251
二、储氢合金条件	252
三、储氢合金分类	252
四、储氢合金的应用	253
任务五 纳米材料	254
一、纳米技术概述	254
二、纳米材料的定义	255
三、纳米材料的分类	255
四、纳米材料的特性	255
五、纳米材料的应用	256

项目检测·····	259
-----------	-----

项目十 选用工程材料

任务一 零件的失效分析·····	261
一、零件失效的概念 ·····	261
二、零件的失效形式 ·····	262
三、零件失效的原因 ·····	263
任务二 零件的选材原则·····	264
一、使用性原则 ·····	265
二、工艺性原则 ·····	265
三、经济性原则 ·····	266
四、环保性原则 ·····	266
任务三 典型零件的选材·····	267
一、轴类零件的选材 ·····	267
二、齿轮类零件的选材 ·····	270
三、弹簧类零件的选材 ·····	274
四、切削刀具类零件的选材 ·····	275
五、冷作模具类零件的选材 ·····	276
项目检测·····	278

参考文献	282
------	-----

项目七

认识非铁合金及粉末冶金

学习目标

知识目标

- ① 掌握铝合金的分类、性能及其选用。
- ② 掌握铜合金的分类、性能及其选用。
- ③ 掌握轴承合金的分类、性能及选用。
- ④ 掌握粉末冶金的分类、性能及选用。

能力目标

- ① 能够选用非铁合金。
- ② 能够选用轴承合金。
- ③ 能够选用粉末冶金。

素质目标

- ① 理解非铁合金行业的绿色制造和可持续发展。
- ② 理解科技创新重要性以及对社会发展的影响。
- ③ 具有工匠精神和敬业专注的职业素养。

工业生产中，通常把以铁为基体的金属材料称为黑色金属，如钢与铸铁，把非铁金属及其合金称为有色金属，如铝、铜、钛、镁、锌、铅、镍等金属及合金。与钢铁等黑色金属材料相比，有色金属具有许多优良的特性，如特殊的电、磁、热性能，耐蚀性能及高的比强度（材料的强度与密度之比）等，是现代工业中不可缺少的材料，在国民经济中占有十分重要的地位。铝、镁、钛等具有相对密度小，比强度高的特点，因而广泛应用于航空、航天、汽车、船舶等行业。本项目重点介绍铝及铝合金、铜及铜合金、钛及钛合金、轴承合金和粉末冶金等。

任务一 铝及铝合金

一、工业纯铝

1. 纯铝的特点

纯铝为银白色，熔点为 660 ℃，晶体结构为面心立方晶格，无同素异构转变，纯铝具有以下特点。

(1) 属于非铁合金中的轻金属, 密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 是钢的三分之一。

(2) 具有良好的导热、导电性。相同横截面积时, 纯铝的导电率为铜的 64%, 仅次于银和金; 相同质量时, 纯铝的导热性是铜的 200%。

(3) 抗大气腐蚀性好, 铝在表面形成致密氧化膜 Al_2O_3 , 能阻止进一步氧化, 但对酸、碱和盐无耐腐蚀能力。铝的电极电位较低, 当和电极电位高的金属接触并且有电解质存在时, 会形成微电池, 产生电化学腐蚀。因此, 铝合金门窗等铝制品的连接件应采用不锈钢件。

(4) 工业纯铝的抗拉强度和硬度很低。 $R_m=90 \sim 120 \text{ MPa}$, 冷压力加工后提高到 $150 \sim 200 \text{ MPa}$, $24 \sim 32 \text{ HBW}$, 力学性能不能满足使用要求, 故工程中不用纯铝制品; 但纯铝的塑性很好, $A=32\% \sim 40\%$, $Z=70\% \sim 90\%$, 适合压力加工制成型材。

(5) 铝的资源丰富, 成本低。铝占地壳质量的 8.3%, 是铁的一倍多, 大于其他非铁金属储藏量的总和, 是分布最广的金属元素。

2. 纯铝的分类和牌号

铝含量不低于 99.00% 时称为纯铝, 纯铝按其纯度分为高纯铝、工业高纯铝和工业纯铝三类。通常把铝含量大于 99.8% 的纯铝叫作高纯铝, 高纯铝主要用在一些高新技术领域和科学研究上, 如用于制造电解电容器铝箔、计算机存储硬盘、半导体器件、集成电路配线和作为超导电缆的稳定化材料等。

工业纯铝的纯度为 98.8% ~ 99.7%, 工业纯铝用途非常广泛: 可做电工铝, 如母线、电线、电缆、电子零件; 可作换热器、冷却器、化工设备; 可做茶、糖等食品和药物的包装用品; 在建筑上作屋面板、天棚、间壁墙、吸音和绝热材料; 以及家庭用具、炊具等。

根据加工方法, 工业纯铝分为未加压力加工产品(铸造纯铝即铝锭)和压力加工产品(变形铝即铝材)两种。

按国家标准 GB/T 1196—2023 规定, 铝锭共有 Al99.85、Al99.80、Al99.70、Al99.60、Al99.50、Al99.00、Al99.7E、Al99.6E 八个牌号(Al 之后的数字是铝含量)。人们通常将 Al99.70 铝称为“A00”铝, 实际上是纯度为 99.7% 的铝, 在伦敦市场上叫作“标准铝”。

按国家标准 GB/T 16474—2011 规定, 纯铝的牌号用四位字符“1×××”的方法命名。“1 000”系列属于铝含量最多的一个系列, 纯度可以达到 99.00% 以上。“1 000”系列铝板根据最后两位数字来确定这个系列的最低铝含量, 比如 1 050 系列最后两位数字为 50, 根据国际牌号命名原则, 铝含量必须达到 99.5% 以上方为合格产品。

“1×××”系的纯铝成形性、表面处理性良好, 耐蚀性最佳, 但强度较低, 纯度愈高, 其强度越低。常用的铝材有 1 050、1 100 等, “1×××”系铝材都相对较软, 主要用来做装饰件或内饰件。

当铝的最低质量分数精确到 0.01% 时, 牌号的最后两位数字表示铝的最低质量分数中小数点后的两位数; 牌号中的第二位字母表示原始纯铝的改型情况, 如果牌号中第二位字母为 A, 则表示为原始纯铝, 如变形铝“1A30”表示铝含量为 99.30% 的原始纯铝; 如果牌号中第二位字母为 B ~ Y 的其他字母, 则表示为原始纯铝的改型, 相对于原始纯铝, 其元素含量略有改变。

二、铝合金

1. 铝的合金化

铝合金是在纯铝中添加适量的 Si、Cu、Mg、Zn、Mn 等元素的合金材料, 铝合金系列及其牌号表示如表 7-1 所示。纯铝的密度小, 高塑性, 易于加工, 但纯铝的强度很低, 不宜用来制造承受载荷的结构

件。铝合金在保持纯铝质轻等优点的同时还能具有较高的强度， R_m 值可达 240 ～ 600 MPa，而且大多数铝合金还可以通过热处理的方法进行强化，这样使得其“比强度”胜过很多合金钢，成为理想的结构材料，广泛用于机械设备制造、运输机械、动力机械及航空工业等方面，使用量仅次于钢。飞机的机身、蒙皮、压气机等常用铝合金制造，以减轻自重；用铝合金代替钢板进行焊接，结构重量可减轻 50% 以上。

表 7-1 铝合金系列及其牌号表示

组 别	牌号系列
纯铝（铝含量不小于 99.00%）	1 × × ×
以铜为主要合金元素的铝合金	2 × × ×
以锰为主要合金元素的铝合金	3 × × ×
以硅为主要合金元素的铝合金	4 × × ×
以镁为主要合金元素的铝合金	5 × × ×
以镁和硅为主要合金元素并以 Mg_2Si 相为强化相的铝合金	6 × × ×
以锌为主要合金元素的铝合金	7 × × ×
以其他合金为主要合金元素的铝合金	8 × × ×
备用合金组	9 × × ×

2. 铝合金的强化

铝合金中无马氏体转变，因而无法像钢那样通过马氏体转变来强化，铝合金是通过“固溶 + 时效处理”来强化的。固溶 + 时效处理是铝合金及其他非铁金属和高温合金的重要强化手段。

（1）固溶强化。纯铝中加入铜、镁、锰、锌、硅、镍等合金元素，形成无限固溶体或有限固溶体，不仅能获得高的强度，而且还能获得优良的塑性与良好的压力加工性能。一般铝的合金化都形成有限的固溶体，如 Al-Cu、Al-Mg、Al-Zn、Al-Si、Al-Mn 等二元合金均形成有限固溶体，并且都有较大的极限溶解度，能起较大的固溶强化效果。

铝铜合金状态图如图 7-1 所示，在 548 ℃ 时，铜在铝中的最大溶解度为 5.65%，随温度下降，到室温时仅为 0.05%；如果将铜质量分数在 0.5% ～ 5.6% 之间的合金加热至固溶线 550 ℃ 以上时，获得均匀的 α 固溶体后再在水中淬火，则有呈过饱和的 α 固溶体，这个过程称为固溶处理，这是热处理的第一步，这时并没有发生晶格类型的转变，晶格畸变也并不严重，单纯的固溶强化效果是有限的，所以，在固溶处理后的强度、硬度提高并不显著，而塑性却有明显的提高。在室温下，过饱和的 α 固溶体是不稳定的，有分解出过剩铜而过渡到相对稳定状态的趋势。

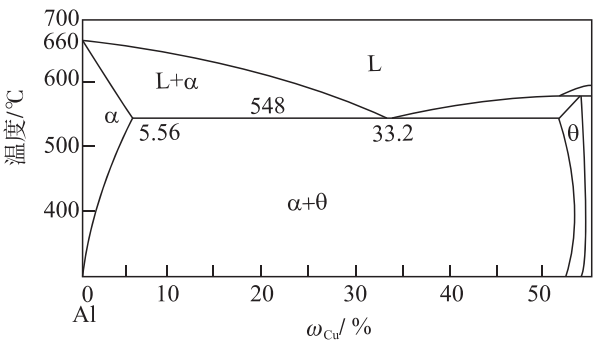


图 7-1 铝铜合金状态图

（2）时效强化。铝合金热处理后可以得到过饱和的铝基固溶体，这种过饱和铝基固溶体在室温或加热到某一温度时，其强度和硬度随时间的延长而增高，但塑性降低，这个过程称为时效。时效过程中使合金的强度、硬度增高的现象称为时效强化。时效强化又称为沉淀强化，是强化铝合金的重要手段，含 4% Cu 的铝合金的人工时效曲线如图 7-2 所示，这是热处理的第二步。在室温下搁置称为自然时效，在

加热时产生的时效称为人工时效。图 7-2 表明, 时效温度越高, 则时效过程就越快, 但强化效果越小。

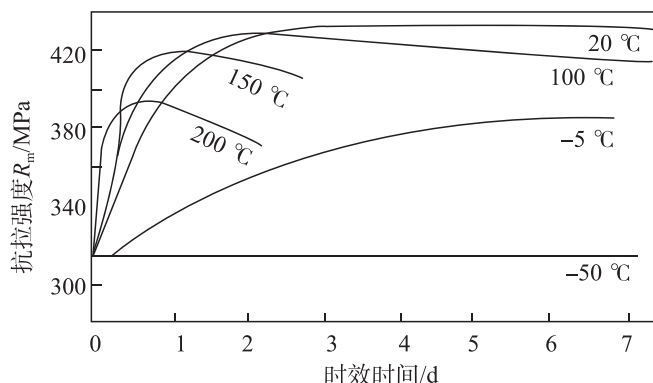


图 7-2 含 4%Cu 的铝合金的人工时效曲线

(3) 细化组织强化。在铝合金中添加微量元素细化组织是提高铝合金力学性能的另一种重要手段。细化组织包括细化铝合金固溶体基体和过剩相组织。

变形铝合金中添加微量钛、锆、铍、锶以及稀土等元素, 它们能形成难熔化合物, 在合金结晶时作为非自发晶核, 起细化晶粒作用, 提高合金的强度和塑性。例如, 锻造铝合金中为细化组织通常添加 0.05% ~ 0.15% 的钛进行细化; 铝锰防锈铝合金铸锭中的组织细化, 一般添加 0.02% ~ 0.30% 钛进行细化, 通常钛以 Al-Ti-B 合金形式加入。

铸造铝合金中常加入微量元素进行变质处理来细化合金组织, 提高强度和塑性。变质处理对不能热处理强化或强化效果不大的铸造铝合金和变形铝合金具有特别重要的意义。比如在铝硅铸造铝合金中加入微量钠或钠盐或锶作变质剂进行变质处理, 细化组织可以显著提高塑性和强度; 同样在铸造铝合金中加入少量锰、铬、钴等元素, 能使杂质铁形成的板块状或针状化合物 AlFeSi 细化, 提高塑性, 加入微量锶可消除或减少初晶硅, 并使共晶硅细化。

当铝中加入的合金元素含量超过其极限溶解度时, 淬火加热时便有一部分不能溶入固溶体的第二相出现, 我们称之为过剩相。在铝合金中过剩相多为硬而脆的金属间化合物, 它们在合金中起阻碍滑移和位错运动的作用, 使强度、硬度提高, 而塑性、韧性降低。合金中过剩相的数量愈多, 其强化效果愈好, 但过剩相多时, 合金变脆, 强度、塑性降低。

(4) 冷变形强化。冷变形强化也称为冷作硬化, 即金属材料在再结晶温度以下冷变形时, 金属内部位错密度增大, 且相互缠结并形成胞状结构, 阻碍位错运动。变形程度越大, 位错缠结越严重, 变形抗力就越大, 强度也就越高。冷变形后强化的程度随变形程度、变形温度以及材料本身的性质而不同。同一材料在同一温度下冷变形时, 变形程度越大则强度越高; 塑性随变形程度的增加而降低。

3. 铝合金的分类

纯铝中加入铜、锌、镁、硅、锰及稀土元素等后, 常得到部分互溶的共晶类二元平衡图, 如图 7-3 所示。图 7-3 中, D 点是合金元素在铝中的最大溶解度, DF 是溶解度曲线, 当合金元素的质量分数超过 D' 时, 则合金中将出现 α 固溶体加金属化合物的共晶组织, 共晶组织流动性好, 适合铸造; 当合金元素的质量分数低于 D' , 加热到 DF 线以后就获得单相 α 固溶体, 有好的压力加工性能。根据铝合金的成分及工艺特点, 以 D' 点为界, 铝合金可分为变形铝合金和铸造铝合金两类。

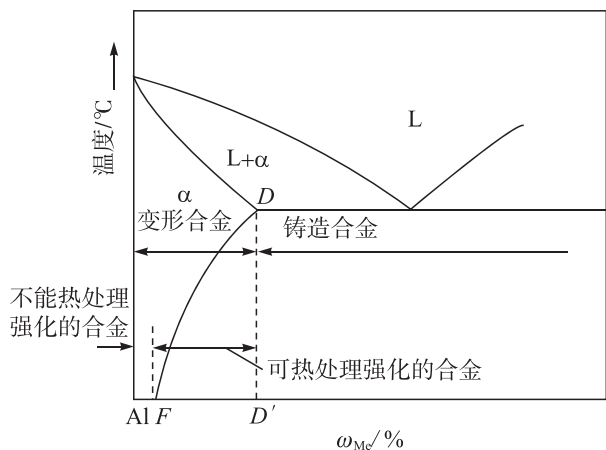


图 7-3 二元铝合金相图

变形铝合金的原牌号采用汉语拼音字母加顺序号表示。防锈铝合金用“铝”和“防”两字的汉语拼音第一个字母“L”“F”加顺序号表示，如“五号防锈铝”用“LF5”表示。按同样的原则，硬铝、超硬铝和锻造铝合金分别用“LY”“LC”“LD”表示。常用变形铝合金的分类、合金名称、合金系、性能特点及牌号举例如表 7-2 所示。

表 7-2 常用变形铝合金的分类、合金名称、合金系、性能特点及牌号举例

分类		合金名称	合金系	性能特点	牌号举例
变形铝合金	不能热处理强化铝合金	防锈铝	Al-Mn	抗腐蚀性、压力加工性、焊接性能好，但强度较低	LF21
			Al-Mg		LF5
	可热处理强化铝合金	硬铝	Al-Cu-Mg	力学性能好，抗腐蚀性较差	LY11，LY12
		超硬铝	Al-Cu-Mg-Zn	室温强度最高，抗腐蚀性较差	LC4
		锻铝	Al-Mg-Si-Cu	锻造性能好，耐热性好	LD5，LD10LD8，LD7
			Al-Cu-Mg-Fe-Ni		
铸造铝合金		简单硅铝明	Al-Si	铸造性能好，不能热处理强化	ZL102
		特殊硅铝明	Al-Si-Mg	铸造性能良好，能热处理强化，具有较高的力学性能	ZL101
			Al-Si-Cu		ZL107
			Al-Si-Mg-Cu		ZL105，ZL110
			Al-Si-Mg-Cu-Ni		ZL109
		铝铜铸造合金	Al-Cu	耐热性好，锻造和抗腐蚀性差	ZL201
		铝镁铸造合金	Al-Mg	力学性能和抗腐蚀性均优	ZL301
		铝锌铸造合金	Al-Zn	能自动淬火，宜于压铸	ZL401

（1）变形铝合金。变形铝合金又分为不可热处理强化型铝合金和可热处理强化型铝合金两种。不可热处理强化型铝合金不能通过热处理来提高机械性能，只能通过冷加工变形来实现强化，它主要包括高纯铝、工业高纯铝、工业纯铝以及防锈铝等；可热处理强化型铝合金可以通过淬火和时效等热处理手段

来提高其机械性能，它包括硬铝、锻铝、超硬铝和特殊铝合金等。变形铝合金常用牌号、成分和力学性能如表 7-3 所示（GB/T 16474—2011）。

表 7-3 变形铝合金常用牌号、成分和力学性能（GB/T 16474—2011）

类别	牌号	化学成分 $\omega\%$ (余量为 Al)					力学性能			用途举例
							R_m /MPa	A_{10} /%	硬度 /HBS	
		Si	Cu	Mg	Mg	Zn	不小于			
防锈铝合金	5A05	0.5	4.8-5.5	0.3 ~ 0.6	0.20	—	280	20	70	导管、日用品以及中载零件及制品
	3A21	0.2	0.05	1.0 ~ 1.6	0.10	Ti0.15	130	20	30	容器、油管、焊条、铆钉、轻载零件及制品
硬铝合金	2A01	2.2 ~ 3.0	0.2 ~ 0.5	0.20	0.10	0.15	300	24	70	结构用中等强度铆钉
	2A11	3.8 ~ 4.8	0.4	0.4 ~ 0.8	0.30	Ni0.10 Ti0.15	420	15	100	中等强度的结构零件，如固定接头、支柱、螺旋桨叶片等
超硬铝合金	7A04	1.4 ~ 2.0	1.8-2.8	0.2 ~ 0.6	5.0 ~ 7.0	Cr0.1 ~ 0.25	600	12	150	主要受力结构件，如飞机大梁、桁架、起落架
锻铝合金	2A50	1.8 ~ 2.6	1.4 ~ 0.8	0.4 ~ 0.8	0.30	Ni0.10 Ti0.15	420	13	05	中等强度的复杂形状锻件及模锻件
	2A70	1.9 ~ 2.5	1.4 ~ 1.8	0.20	0.30	Ni0.9 ~ 1.5 Ti0.02 ~ 0.1	440	12	120	内燃机活塞和锻件、结构件

①防锈铝合金。防锈铝合金主要包括铝锰系和铝镁系。铝锰系常见牌号有 3A21（旧牌号为 LF21），锰的质量分数在 1.0% ~ 1.6% 时，合金有较高强度、塑性、耐腐蚀性和焊接性。常用的铝镁系牌号有 5A05（LF5）等，当 Mg 含量大于 5% 时，合金具有较好的耐腐蚀性，随着镁的质量分数的增加，合金的强度、塑性均增加。

这两类铝合金均只能通过冷加工硬化的方法提高强度，它们的塑性好、强度中等。由于铝的耐腐蚀性和塑性较好，常以板材、箔材、型材、管材、线材等供应，制作焊接件、容器、管道、蒙皮、骨架，以及深冲、弯曲的零件和制品等。

②硬铝合金。硬铝合金主要是铝铜镁系，此外，合金还有锰及少量杂质元素，如铁、硅、镍、锌等。铜、镁的主要作用是在时效过程中产生强化相，少量锰可提高耐腐蚀性。硬铝合金按其铜、镁的质量分数及性能的不同可分为三种类型：低强度硬铝，如 2A01（LY1）、LY3、LY10 等铝合金；标准强度硬铝，如 2A11（LY11）等铝合金；高强度铝合金，如 2A12（LY12）等铝合金。

各种硬铝合金都可进行时效硬化，也可通过变形硬化。应该注意，硬铝合金固溶处理的加热温度范围很窄，例如 2A12（LY12）最理想的淬火温度为 $500 \pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度过高易引起过烧，过低则强化效果不

佳。硬铝合金一般进行自然时效，时间一般不少于4天，比人工时效有较小的晶间腐蚀倾向。

硬铝合金的耐腐蚀性较差，特别是在海水中，在硬铝表面包一层高纯度铝可提高其抗腐蚀能力。低强度硬铝的比强度较差，具有较高的塑性，适宜于制作铆钉，常称为铆钉硬铝；标准强度硬铝具有较高强度和较好的塑性，中等的抗腐蚀性，主要用于载荷的结构件，如骨架、螺旋桨叶、大型铆钉、螺栓等；高强度硬铝具有更高的强度、屈服极限及良好的耐热性，但塑性较低。2A12（LY12）是工业应用最广泛的一种高强度硬铝合金，常用来制作高强度结构件如骨架、蒙皮、梁、销、轴等。

③超硬铝合金。铝、锌、镁、铜系合金是室温强度最高的一类铝合金，其强度可达500～700 MPa，超过400～430 MPa的高强度硬铝，故称超硬铝合金。超硬铝合金经固溶时效处理后，形成多种强化相，具有很高的强度与硬度。它的缺点是抗腐蚀性差，故也需要包铝保护，因超硬铝合金电位比纯铝低，故常采用电位更低的 $\omega_{Zn}=1\%$ 的Al-Zn合金作为包铝层；超硬铝合金的耐热强度也不如硬铝，不宜在120～130℃以上工作。

因自然时效时间长和有较高的应力腐蚀倾向，超硬铝合金常采用人工时效处理，时效温度为120～140℃，时间为16h～24h。常用牌号有7A04（LC4）等，用于受力较大的结构件，如飞机大梁、桁条、加强框、起落架等。

④锻造铝合金。铝镁硅铜系合金具有优良的锻造工艺性能，故称为锻造铝合金。它的力学性能与硬铝相近，工艺性能优于硬铝，但耐腐蚀性稍差。为提高时效强化效果，锻铝合金在淬火后应立即进行人工时效，时效温度为150～180℃，时间为6h～10h。常用牌号为2A50（LD5）、6A02（LD2）等，用于外形复杂、中等强度的锻件和模锻件。

经过时效处理的铝合金，在切削过程中还会产生应力，对于精度要求高的工件，还需进行去应力退火。人工时效后的铝合金去应力退火温度，应比淬火后的时效温度低20～40℃，时间为2h～4h；对于自然时效后的硬铝，去应力退火温度应为80～100℃，时间为2h。

（2）铸造铝合金。在铝合金中，铸造铝合金的应用最早，铸造铝合金具有与变形铝合金相同的合金体系，具有与变形铝合金相同的强化机理（除应变硬化外），同样可分为热处理强化型和非热处理强化型两大类。

目前，铸造铝合金在国际上无统一标准，各国都有自己的合金命名及术语。GB/T 1173—2013《铸造铝合金》中，铸造铝合金的牌号用“铸”字的汉语拼音首字母“Z”后加上合金元素符号“Al”，再加上主要合金元素符号及该元素含量的百分数表示，如ZAlSi7Mg。

铸造铝合金的代号用“铸”“铝”两字的汉语拼音首字母“ZL”后加上三位数字表示，如ZL101。第一位数字表示合金的系列，第二、三两位数字表示合金的顺序号，顺序号不同，合金的化学成分也不同，优质合金在其代号后附加字母“A”。

目前铸造铝合金按化学成分可分为Al-Si系合金、Al-Cu系合金、Al-Mg系合金、Al-Zn系合金和Al-RE系合金。除了以上五类常见的铸造铝合金以外，还有Al-Li系铸造铝合金、Al-Sn系铸造铝合金、半固态铸造铝合金、铸造泡沫铝合金等。常用铸造铝合金的牌号、化学成分、力学性能和用途如表7-4所示。

表 7-4 常用铸造铝合金的牌号、化学成分、力学性能和用途

代号	主要化学成分 $\omega/\%$ (余量为 Al)					力学性能			用途举例
						R_m /MPa	A_{10} /%	硬度 /HBS	
	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	不小于			
ZL102	10.0 ~ 13.0	—	—	—	—	150	4	50	适于 200 ℃ 以下工作，形状复杂的砂型、金属型和压力铸造零件，要求气密性好，承受低载荷，如仪表、水泵壳体
ZL104	8.0 ~ 10.5	—	0.17 ~ 0.35	0.2 ~ 0.5	—	200	1.5	70	适于 200 ℃ 以下工作的砂型、金属型和压力铸造的形状复杂零件，如发动机气缸体等
ZL203	—	4.0 ~ 5.0	—	—	—	230	3	70	适于砂型铸造、中等载荷、形状较简单、要求加工性能好，工作温度小于 200 ℃ 的零件，如托架等
ZL303	0.8 ~ 1.3	—	4.5 ~ 5.5	0.1 ~ 0.4	—	150	1	55	腐蚀介质下，严寒大气中工作的中等载荷零件，如船舶配件等
ZL401	6.0 ~ 8.0	—	0.1 ~ 0.3	—	9.0 ~ 13.0	250	1.5	90	适于压力铸造、工作温度不超过 200 ℃、结构开关复杂的汽车、飞机零件

①铝硅铸造合金。铝硅铸造合金又称硅铝明, 除硅外还加入其他合金元素的称为特殊硅铝明。铝硅系合金具有较好的流动性, 较小的铸造收缩率, 优良的焊接性、抗腐蚀性及足够的力学性能。

简单硅铝明中硅的质量分数为 11% ~ 13% (ZL102) 时, 铸造后的组织几乎全为共晶体, 铝硅二元合金状态图如图 7-4 所示。其组织为粗大的针状硅与铝基固溶体组成的共晶体和少量的斑状初晶硅, 合金的力学性能不高, $R_m < 140$ MPa, $A < 3\%$; 采用变质处理可提高其力学性能, 即浇注前在熔融的合金中加入占铝合金总量 2% ~ 3% 的变质剂, 常用变质剂为 $2/3\text{NaF} + 1/3\text{NaCl}$ 的混合物, 以细化晶粒, 提高力学性能, 变质处理后 ZL102 的 R_m 可达 180 MPa、 A 可达 8%。

简单硅铝明尚不能时效强化, 为进一步提高其强度, 常加入能形成强化相的铜、镁、锌等元素, 制成特殊硅铝明。常用的特殊硅铝明有 ZL101、ZL104、ZL105、ZL107、ZL109 等, 它们经时效处理后强度显著提高, 如 ZL101、ZL104 的 R_m 可达 240 MPa, ZL107 的 R_m 可达 260 MPa。特殊硅铝明常用来制作形状复杂和强度要求较高的铸件, 如气缸体、电动机壳体、气缸头等零件。

②铝铜铸造合金。铝铜铸造合金的耐热性是铸铝合金中最高的, 铜质量分数为 4% ~ 5% 时的合金热处理强化效果最好, 具有高的强度和塑性, 但铸造性能和耐腐蚀性较差, 随着铜的质量分数增加, 合金的铸造性能提高而耐腐蚀性降低, 常用牌号有 ZL201、ZL202 和 ZL203 等。ZL201 主要用于内燃机气缸、活塞等; ZL202 主要用于高强度、高硬度的零件及高温下工作的零件; ZL203 主要用于高强度、高塑性零件。

③铝镁铸造合金。铝镁铸造合金的密度小 (2.25 g/cm^3), 耐腐蚀性最好, 强度最高 (R_m 可达

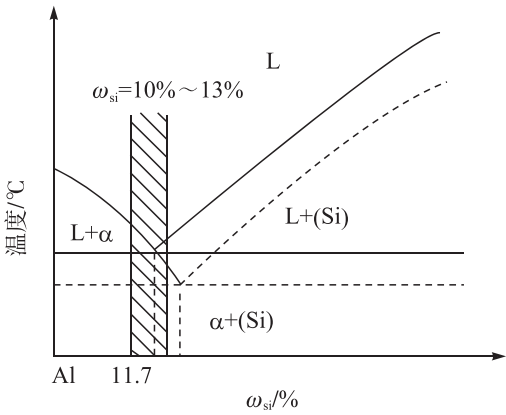


图 7-4 铝硅合金状态图 (实线为未变质; 虚线为变质后)

350 MPa), 但铸造性能和热强度较差, 工作温度不超过 200 ℃, 可时效强化, 但效果不佳, 常用牌号有 ZL301、ZL302 等, 可制作承受冲击、耐海水和大气腐蚀、外形较简单的重要零件和接头等, 如船配件、氨用泵体等。

④铝锌铸造合金。铝锌铸造合金有较高的强度, 良好的铸造性能, 且价格便宜。其缺点是抗腐蚀性较差, 常用的铝锌合金是 ZL401, 主要用于制作工作温度不超过 200 ℃, 结构形状复杂的汽车零件、飞机零件、医疗机械和仪器零件等。

任务二 铜及铜合金

一、工业纯铜

工业上使用的纯铜表面氧化后呈紫红色, 故称为紫铜。纯铜是一种密度为 8.94 g/cm³ 的贵金属, 熔点为 1 083 ℃, 纯铜无同素异构转变和磁性。纯铜最显著的特点是导电性、导热性好, 仅次于银, 常用于制作导线、散热器及冷凝器等; 纯铜具有很高的化学稳定性, 在大气、淡水和碱溶液中具有良好的耐腐蚀性, 但在氨盐、氯盐以及氧化性的硝酸、浓硫酸中耐蚀性极差; 纯铜具有面心立方晶格, 具有良好的塑性 (A=50%, Z=70%), 适宜冷、热压力加工, 它能在低温下保持良好的塑性和冲击韧性, 常用于制造低温设备和高压设备的垫片。

工业纯铜中常含有质量分数为 0.1% ~ 0.5% 的锡、铋、氧、硫、磷等杂质, 它们不仅降低了铜的导电和导热性, 铅、铋等杂质还会与铜形成低熔点 (<400 ℃) 的共晶体分布在铜的晶界上, 使其在热加工时产生热脆性; 氧、硫等杂质与铜形成的共晶体则会使铜产生冷脆性。

工业纯铜按杂质含量可分为 T1、T2、T3 三种, “T” 为铜的汉语拼音首字母, 其后的数字为编号, 数字越大, 纯度越低, 如 T1 的含铜量为 99.95%, T3 的含铜量为 99.70%。纯铜一般不作为结构材料使用, 主要用于制作电线、电缆、导热零件及配制铜合金。工业纯铜的牌号、成分及用途如表 7-5 所示。

表 7-5 工业纯铜的牌号、成分及用途

牌号	代号	纯度 /%	杂质 /%		杂质总量 /%	用途
			Bi	Pb		
一号铜	T1	99.95	0.002	0.005	0.05	导电材料和配制高纯度合金
二号铜	T2	99.90	0.002	0.005	0.1	导电材料, 制作电线、电缆等
三号铜	T3	99.70	0.002	0.01	0.3	铜材、电气开关、垫圈、铆钉、油管等
四号铜	T4	99.50	0.003	0.05	0.5	铜材、电气开关、垫圈、铆钉、油管等

二、铜合金

1. 铜合金的强化

纯铜的强度、硬度不高, 利用冷变形加工可使铜的 R_m 提高到 400 ~ 500 MPa, 硬度可达 100 ~ 120 HBW, 但塑性会降低至变形前的 4% 左右, 而且导电性大为降低。为了保持铜的塑性等特性, 对铜实行合金化是提高其强度的有效途径。

铜的合金化是通过向铜中添加 Zn、Al、Sn、Mn、Be、Si 等合金元素进行固溶强化、时效强化和过剩相强化等,以达到强化的目的。

(1) 工业纯铜的热处理。工业纯铜热处理主要是再结晶退火,目的是改变晶粒度、消除内应力、使金属软化,退火温度为 $500 \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了防止氢病,必须将工件清洗干净。对于含氧铜,特别是含氧量大于 2% 的纯铜,退火应在弱还原环境下进行,最好在真空炉中进行,或将退火温度限制在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;退火完毕,工件应迅速水冷,以减少氧化。

(2) 铜合金的热处理。铜合金常用的热处理方式有均匀化退火、去应力退火、再结晶退火、固溶及时效处理等。

①均匀化退火。主要目的是使铸锭、铸件的化学成分均匀,主要在冶金厂、铸造车间进行。

②去应力退火。主要目的是消除变形加工、焊接、铸造过程中产生的残余内应力,稳定冷变形或焊接件的尺寸与性能,防止工件在切削加工时产生变形。冷变形黄铜、铝青铜、硅青铜,其应力腐蚀破裂倾向严重,必须进行去应力退火。铜合金去应力退火温度比再结晶退火温度低 $30 \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,约为 $230 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$;成分复杂的铜合金温度稍高,一般为 $300 \sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温时间为 $30\text{ min} \sim 60\text{ min}$ 。

③再结晶退火。包括加工工序间的中间(再结晶)退火和成品的最终(再结晶)退火,目的是消除加工硬化,恢复塑性和获得细晶粒组织。黄铜的晶粒度对其加工性能有较大影响,细晶粒组织强度高,加工表面质量好,但变形抗力大,成型难度大;粗晶粒组织易于加工,但表面质量差,疲劳性能也差。因此,用于压力加工的青黄铜,必须根据需要控制晶粒度。

④光亮退火。铜及铜合金在加工过程中容易氧化,为了防止氧化,提高工件表面质量,允许在保护气氛或真空炉中退火,也就是光亮退火。常用保护气有水蒸气、氨分解气、氮气、干燥的氢气等。

⑤固溶处理及时效。铜合金固溶处理的目的是获得成分均匀的过饱和固溶体,并通过随后的时效处理获得强化效果。有些合金(如铍青铜、硅青铜等)固溶处理可提高塑性,便于进行冷变形加工;复杂铝青铜固溶处理后可获得类马氏体组织。

铜合金固溶处理必须严格控制炉温。温度过高会使合金晶粒粗大,严重氧化和过烧,变脆;温度过低,固溶不充分,又会影响随后的时效强化。炉温精度应该控制在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,加热后一般采用水冷。

铜合金时效一般采用人工时效或热加工后直接人工时效;已经时效过的,为了消除某种原因而产生的内应力,还需要进行再时效(温度比前段略低)。温度控制精度也要求更高,一般不超出 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围。

2. 铜合金的分类

铜合金是以铜为基体和其他元素组成的合金。根据化学成分的不同,铜合金分为黄铜、青铜和白铜三大类。

(1) 黄铜。黄铜是以锌为主加元素的铜锌合金。黄铜具有较高的强度和良好的塑性,良好的导电性和导热性,良好的加工性能和铸造性能,耐蚀性与纯铜相近,广泛应用于化工行业。黄铜按化学成分的不同,分为普通黄铜和特殊黄铜;按生产方式不同,可分为压力加工黄铜和铸造黄铜。

①普通黄铜。普通黄铜就是铜锌二元合金,铜锌(Cu-Zn)二元合金相图如图 7-5 所示。

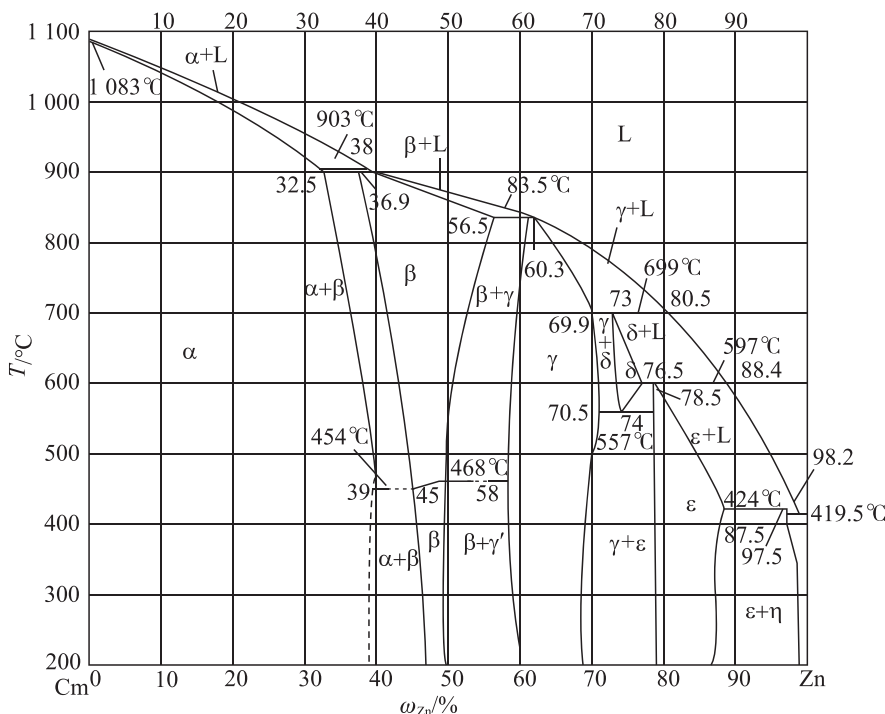


图 7-5 Cu-Zn 二元合金相图

依据 Cu-Zn 二元合金相图，黄铜的室温组织有三种：含锌量在 35% 以下的黄铜，室温下的显微组织由单相的 α 固溶体组成，称为 α 黄铜；含锌量在 36% ~ 46% 范围内的黄铜，室温下的显微组织由 $(\alpha + \beta)$ 两相组成，称为 $(\alpha + \beta)$ 黄铜（两相黄铜）；含锌量超越 46% ~ 50% 的黄铜，室温下的显微组织仅由 β 相组成，称为 β 黄铜。

α 相是锌溶入铜中形成的固溶体，锌的溶解度随温度的变化而变化。 α 相具有面心立方晶格，塑性好，适于进行冷、热加工，并具有优良的铸造、焊接和镀锡能力。

β 相是以电子化合物 CuZn 为基的有序固溶体，具有体心立方晶格，性能硬而脆。当温度降至 456 °C 以下时， β 相有序转化为 β' 相。室温 β' 相硬且脆，难以进行冷加工变形；但高温 β' 相塑性好，它们可以进行热加工变形。

含锌量对黄铜力学性能的影响如图 7-6 所示。黄铜的含锌量对其力学性能有很大的影响。当 $\omega_{Zn} \leq 32\%$ 时，随着含锌量的增加，黄铜的强度和伸长率都升高；当 $\omega_{Zn} > 32\%$ 时，组织中出现 β' 相，塑性开始下降而强度增高；当 $\omega_{Zn} > 45\%$ 以后，组织全部为 β' 相，强度急剧下降，塑性继续降低，在生产中已无实用价值。

普通黄铜的牌号以“黄”字的汉语拼音首字母“H”+ 数字表示，数字表示平均含铜量的百分数。如 H62 表示平均含铜量为 62%、含锌量为 38% 的普通黄铜。

铸造黄铜的牌号以“铸”字的汉语拼音首字母“Z”+ CuZn + 主加元素锌的含量 + 第二合金元素符号 + 第二合金元素含量组成，如 ZCuZn38 表示平均含锌量为 38% 的铸造黄铜。

常用的普通黄铜 H90、H80 具有优良的耐蚀性、导热性，适宜于冷加工，常用于镀层、艺术装饰品、

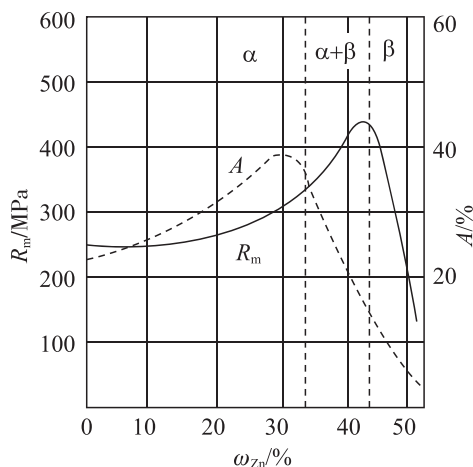


图 7-6 含锌量对黄铜力学性能的影响

钱币及散热器等；H70、H68 按成分俗称七三黄铜，具有优良的冷、热变形能力，适于制造冷变形零件，常用于形状复杂而要求耐腐蚀的管、套类零件，如弹壳、乐器、冷凝器管等。H62、H59 按成分称为六四黄铜，强度较高并具有一定的耐蚀性，广泛用来制造电子电器上要求导电、耐蚀及适当强度的结构件，如螺栓、螺母、弹簧、轴套等。

②特殊黄铜。特殊黄铜也称为复杂黄铜，在黄铜中加入锡、铝、硅、锰等元素形成的合金称为特殊黄铜。其中，锰和铝可以提高黄铜的强度；铝、锰和硅可以提高黄铜的耐蚀性和耐磨性；铝可以提高黄铜的可加工性。

特殊黄铜的牌号用“H+ 主加元素符号+铜的含量+主加元素含量”。如 HPb60-1 表示含铜量 60%、含铅量 1%、其余为锌含量的铅黄铜；ZCuZn31Al2 表示含锌量 31%、含铝量 2%，其余为含铜量的铸造铝黄铜。常用黄铜的牌号、化学成分、力学性能和用途如表 7-6 所示。

表 7-6 常用黄铜的牌号、化学成分、力学性能和用途

类别	牌号	主要成分 $\omega/\%$ (余量为 Zn)		力学性能		用途举例
		Cu	其他	R_m/MPa	$A_5/\%$	
普通黄铜	H80	78.5 ~ 81.5	—	265 ~ 392	50	用于镀层及装饰
	H68	67.0 ~ 70.0	—	24 ~ 392	40	管道、散热器、螺母、垫片等
	H62	60.5 ~ 63.5	—	294 ~ 412	35	散热器、垫圈等
特殊黄铜	HPb59-1	57.0 ~ 60.0	Fe0.5 Pb0.8 ~ 1.9	343 ~ 441	25	用于热冲压和切削加工件
	HMn58-2	57.0 ~ 60.0	Mn1.0 ~ 2.0 Fe1.0	382 ~ 588	35	耐腐蚀和弱电用零件
铸铝黄铜	ZCuZn31Al2	66 ~ 68	Al2.0 ~ 3.0	295 ~ 390	12 ~ 15	耐蚀性较高的零件
	ZCuZn16Si4	79 ~ 81	Si2.5 ~ 4.5	345 ~ 390	15 ~ 20	水泵叶轮、旋塞及船用配件等

(2) 白铜。白铜是以镍为主加元素的铜镍合金。白铜按化学成分，分为普通白铜和特殊白铜两类。

①普通白铜。普通白铜是镍质量分数小于 50% 的铜镍合金，普通白铜只含有铜和镍。

普通白铜的牌号以“白”的汉语拼音首字母“B”+ 数字表示，后面的数字表示镍的含量，如 B19 表示含镍 19% 的普通白铜。

②特殊白铜。特殊白铜是在普通白铜的基础上加入锌、锰、铝、铁、铅等合金元素，分别称为锌白铜、锰白铜、铝白铜、铁白铜、铅白铜等。特殊白铜的牌号以“B+ 主加元素符号+镍的含量+主加元素含量”表示，如 BMn40-1.5 表示含镍量 40%、含锰量 1.5% 的特殊白铜。

铜、镍之间彼此可无限固溶，从而形成连续固溶体，因此可以任何比例混合形成无限固溶的单相 α 固溶体，具有足够的强度和优良的塑性，可进行冷、热变形加工；铜、镍合金可通过固溶强化和加工硬化提高强度和硬度。

在工业铜合金中，白铜的耐蚀性最好，它还具有良好的抗冲击腐蚀性和抗应力腐蚀性，是海水凝结水管的理想材料。普通白铜通常用作高强度、高耐蚀性、高压、低温下的结构材料。特殊白铜中的铝白铜，高温性能优良，适合做内燃机的高温零件；硅白铜的伸长率及导电性好，适合做高强度跨距输电线、电车架空电线等；锌白铜的耐热耐蚀耐疲劳好，电阻温度系数小，制作弹簧或热电材料。

白铜按其用途分类，可分为结构白铜和电工白铜。结构白铜包括普通白铜、铁白铜、锌白铜、铝白

铜，具有良好的耐腐蚀性和加工工艺性，用于制作冷凝器、热交换器、医疗器械、耐蚀零件、艺术品等。电工白铜包括普通白铜、锰白铜。锰白铜 BMn3-12 又称锰铜，是一种精密电阻合金，这类合金具有高的电阻率和低的电阻率温度系数，适于制作标准电阻元件和精密电阻元件，是制造精密电工仪器、变阻器、仪表、精密电阻、应变片等用的材料。锰白铜 BMn40-1.5 又称康铜，康铜具有高电阻、高热电势、低电阻温度系数，用于补偿导线、热电偶、电阻仪器和加热器等。

（3）青铜。除了黄铜和白铜，其他铜合金统称为青铜，其中铜、锡的合金称为锡青铜，铜和铝、硅、铅、铜和锰的合金称为无锡青铜或特殊青铜。因此，青铜实际上包含锡青铜、铝青铜、铍青铜、磷青铜、硅青铜等。

压力加工青铜的牌号是“青”的汉语拼音首字母“Q”+主加元素符号+主加元素质量分数+其他元素的质量分数，如牌号 QSn4-3 表示含锡 4%、含锌 3% 的锡青铜。

铸造青铜的牌号是在牌号前加“铸”字的汉语拼音首字母，如牌号 ZCuSn10Pb1 表示含锡 10%、含铅 1%，其余为铜的铸造青铜。常用青铜的牌号、化学成分、力学性能及用途如表 7-7 所示。

表 7-7 常用青铜的牌号、化学成分、力学性能和用途

类型	牌号	主要成分 $\omega/\%$ (余量为 Cu)		力学性能		用途举例
		Sn	其他	R_m/MPa	$A_5/\%$	
压力加工锡青铜	QSn4-3	3.5 ~ 4.5	Zn2.7 ~ 3.3	350	40	弹簧、管配件和化工机械等
	QSn6.5-0.1	6.0 ~ 7.0	P0.10 ~ 0.25 Zn0.3	300	38	耐磨件、弹性零件等
				500	5	
				600	1	
	QSn4-4-2.5	3.0 ~ 5.0	Zn3.0 ~ 5.0 Pb1.5 ~ 3.5	300 ~ 350	35 ~ 45	轴承、轴套等
铸造锡青铜	ZCuSn10Zn2	9.0 ~ 11.0	Zn1.0 ~ 3.0	245	6	泵、阀、齿轮等
				240	12	
	ZCuSn10P1	9.0 ~ 11.5	P0.5 ~ 1.0	310	2	重要的轴瓦、齿轮等
				220	3	
特殊青铜	ZCuAl10Fe3	—	Al8.5 ~ 11.0 Fe2.0 ~ 4.0	540	15	耐磨、耐蚀重型铸件，如蜗轮
				490	13	
	QBe2	—	Be1.9 ~ 2.2 Ni0.2 ~ 0.5	500	3	重要仪表的弹簧、齿轮等
	ZCuPb30	—	Pb27 ~ 33	—	—	高速双金属轴瓦、减磨零件等

①锡青铜。锡青铜是以锡为主加元素的铜合金。当 $\omega_{\text{Sn}} \leq 5\%$ 时，Sn 溶于 Cu 中形成面心立方晶格的 α 固溶体，随着锡含量的增加，合金的强度和塑性都增加；当 $\omega_{\text{Sn}} >$ 时，组织中会出现硬而脆的 δ 相，强度虽有增加但塑性下降；当 $\omega_{\text{Sn}} > 20\%$ 时，由于出现过多的 δ 相，使合金变得很脆，强度也显著下降，因此工业用锡青铜的锡含量一般为 3% ~ 14%。

锡青铜铸造流动性差，铸件密度低，易渗漏，但体积收缩率在有色金属中最小；锡青铜耐蚀性良好，在大气、海水及无机盐溶液中的耐蚀性比纯铜和黄铜好，但在硫酸、盐酸和氨水中的耐蚀性较差。

$\omega_{\text{Sn}} < 5\%$ 的锡青铜适合冷加工； ω_{Sn} 为 $5\% \sim 7\%$ 的锡青铜适合热加工； ω_{Sn} 为 $10 \sim 14\%$ 的锡青铜适合铸造。

锡青铜中除 Sn 外，还加入少量的 Zn、P、Pb、Ni 等合金元素形成多元锡青铜。加入 P 可以有效提高合金的机械性能，尤其是弹性极限和疲劳极限，适合做弹簧；加入 Zn 能提升铸造流动性和致密性；加入 Pb 能改善切削性和耐磨性；加入 Zr、B、V、Ti 等元素，可以细化晶粒。

常用锡青铜有 QSn4-3、QSn6.5-0.4、ZCuSn10Pb1 等。含锡 10% 的锡青铜俗称炮铜，用于制作齿轮、阀、螺旋桨等耐蚀和耐磨器件；含锡 $12 \sim 15\%$ 的锡青铜，用于制作铁路车轴上的低速重载轴承；含锡 $4 \sim 10\%$ 的锡青铜，延展性好，铸造性优异，用于制作硬币；含锡 $20 \sim 32\%$ 的锡青铜，用于制作大钟，锡青铜的杂质越少，声音越清脆悦耳；含铜 $80\% \sim 90\%$ 、锡 $2\% \sim 8\%$ 、锌 $1\% \sim 12\%$ 、铅 $1\% \sim 3\%$ 的锡青铜，用于制作铜像及青铜器，含锌提高溶液流动性，铸件表面纹路清晰；含铜 $2/3$ 、含锡 $1/3$ 的锡青铜，可用来制作铜镜，加入少量镍和砷可以制作科学仪器。

② 铝青铜。铝青铜是以铝为主加元素的特殊青铜。因锡的价格较高，铝价格便宜，以铝青铜代替部分锡青铜。铝青铜的铝含量 $< 11.5\%$ ，随着铝含量提高，强度、硬度提高，塑性下降。当铝含量为 $5\% \sim 8\%$ 时，冷、加工热加工均可；当铝含量为 $8\% \sim 11\%$ ，合金的流动性差，一般用作铸造合金。铸造铝青铜的体积收缩率大，有氧化铝夹杂，易开裂；但铝青铜表面形成致密的氧化膜，抗蚀性胜过锡青铜。铝青铜中还加入少量的铁、镍、锰等合金元素形成多元铝青铜，其中加入铁元素能细化晶粒，避免自发回火脆性；加入锰元素能提高强度，避免回火脆性；加入镍元素可以提高耐热性和耐蚀性。

③ 铍青铜。铍青铜是以铍为主加元素的特殊青铜。铍比银贵，是极其珍贵的金属材料，铍青铜的抗拉强度 R_m 高达 $1\,200 \sim 1\,500\text{ MPa}$ ，硬度可达 $350 \sim 400\text{ HBS}$ ，远超其他任何铜合金，可与高强度合金钢媲美；铍青铜具有很高的弹性极限、疲劳强度、耐磨性和抗蚀性，导电、导热性极好，并且耐热无磁性，受冲击时无火花产生。铍青铜常用来制造各种重要的精密弹性元件、特殊耐磨元件（钟表齿轮，高温、高压和高速下的轴承）以及防爆工具等，用于矿山、炼油厂等冲击无火花的场合，但铍是稀有金属，价格昂贵，应用上受到限制。

铍青铜的铍含量在 $1.7\% \sim 2.5\%$ ，铍溶于铜中形成 α 固溶体，固溶度随温度变化大。它是唯一可以进行固溶时效强化的铜合金，经固溶处理和人工时效处理后，铍青铜可以得到很高的强度和硬度。铍青铜中常加入 $0.2\% \sim 0.5\%$ 的镍，组成 Cu-Be-Ni 三元合金，少量的镍能提高弹性、强度、耐磨性和耐蚀性。常用牌号有 QBe2、QBe2.5、QBe1.7、QBe1.9 等，可制作弹簧、耐磨轴承、防爆工具等。

铸造铍青铜的典型用途是制作塑料或玻璃的铸模、电阻焊电极、石油开采用防爆工具、海底电缆防护罩等；压力加工铍青铜的典型用途是制作电子器件中的载流簧片、接插件、触点、紧固弹簧、板簧和螺旋簧、膜盒、波纹管及引线框架等。

三、铜合金的发展趋势

(1) 高纯化。高纯化的主要目的是尽可能地提高材料的导电、导热性。工业用铜的含铜量由 99.90% 到 99.95% ，再到 99.99% (4N) 甚至更高，如含铜 $99.999\,9\%$ (6N) 的超纯铜，杂质含量要求也更加严格。如含氧量由 $0.01\% \sim 0.05\%$ 减少到 $0.001\% \sim 0.006\%$ ，直至 $0.000\,2\% \sim 0.000\,3\%$ ，最大限度地减少杂质对导电、导热性的影响。

典型应用实例：网络传输连接导线用高纯铜、电真空器件用高纯无氧铜、精确制导和高保真信号传输及超导体用单晶铜和超纯铜等。

铜合金材料向高纯化方向发展的另一方面表现在微合金化铜合金中要求铜合金基体的高纯净化，以

保证材料具备更高的综合性能。

(2) 微合金化。微合金化的目的是牺牲最少的导电导热性换取其他性能,如强度的大幅度提升等。如加入 0.1% 左右的铁 (Fe)、镁 (Mg)、碲 (Te)、硅 (Si)、银 (Ag)、钛 (Ti)、铬 (Cr) 或锆 (Zr)、稀土元素等,可以提高其强度、硬度、抗软化温度或易切削性等。

微合金化铜是当前铜合金材料开发的热门之一,有氧铜和高强高导铜合金是最主要的微合金化铜。有氧铜的概念是相对无氧铜而言的,其铜含量在 99.90% 以上,相当于一般的纯铜,但其氧含量控制在 0.005% ~ 0.02%,同时可以实现导电率在 100% IACS (国际退火铜标准 International Annealed Copper Standard) 以上。这是因为适量的氧对于晶间的杂质元素起到一定的氧化化合作用,在一定程度上净化了基体。有氧铜生产最大的特点是其原料的低成本化,采用品位不高的紫铜旧料生产相当于高导电导热性能的有氧铜材料。

高强高导铜合金由于其表现出良好的综合性能,受到了世界各国材料科技工作者的青睐,是近年来发展最快的一类铜合金。其微合金化加入的元素主要有 P、Fe、Cr、Zr、Ni、Si、Ag、Sn、Al 等,具有代表性的合金体系主要有 Cu-P、Cu-Fe-P 系、Cu-Ni-Si 系、Cu-Cr、Cu-Cr-Zr 系、Cu-Ag、Cu-Ag-Cr、Cu-Ag-Zr 系、Cu-Sn 系等,以及各种加稀土的合金体系。合金中其他组元的含量之和最少可以是 0.01% ~ 0.1%,最高一般不超过 3%,其共同的特点是材料具有高强高导性能。

(3) 复杂多元合金化。为了进一步改善铜及其合金的强度、耐蚀性、耐磨性及其他性能,或者为了满足某些特殊应用要求,在现有青铜、黄铜等的基础上添加到五元、六元等多种组元,实现材料高弹性、高耐磨、高耐蚀、易切削等不同的功能,多组元(四个或四个以上组元)合金化成为铜合金开发的另一个热门话题,新的复杂合金层出不穷。典型的合金有多元锰黄铜、硅锰黄铜、加硼锡黄铜、无铅易切削铜合金等,其共同特点是高强高韧性,抗拉强度一般可达 600 ~ 700 MPa。

例如,新型锰黄铜 HMn59-2-1-0.5 (58% ~ 59%Cu、1.8% ~ 2.2%Mn、1.4% ~ 1.7%Al、0.36% ~ 0.65%Fe、0.6% ~ 0.9%Si、0.1% ~ 0.4%Sn、0.3% ~ 0.6%Pb、余量 Zn),其强度达 600 MPa 以上,伸长率超过 20%,硬度在 180 HB 以上。

新型铝黄铜 HA164-5-4-2 (63.5% ~ 65.5%Cu、4.5% ~ 6.0%Al、3.0% ~ 5.0%Mn、2.0% ~ 3.0%Fe、0.2% ~ 1.0%Pb、余量 Zn),其强度达到 750 MPa 以上,硬度超过 HB 220。

新型铝青铜 QA19-5-1-1 (8.0% ~ 10.0%Al、4.0% ~ 6.0%Ni、0.5% ~ 1.5%Mn、0.5% ~ 1.5%Fe、余量 Cu),其强度为 650 MPa,屈服强度达 400 MPa,伸长率达 14% 以上。应用这些材料制造汽车同步器齿环、高压泵摩擦副或电极铜楔,其寿命比普通黄铜或青铜制造的同类产品要高一至数倍。

近年来,随着人们环保意识的提高,环保成为世界文明发展的主题。人们更加关注铅、铍、镉、砷等有害元素的影响,无铅易切削黄铜、无铍高弹性铜合金、无砷耐蚀铜合金等环境友好铜合金材料的开发成为铜合金材料的重要发展方向之一。

(4) 复合材料化。铜合金材料方式主要有两种:一是引入合金元素强化铜基体形成合金;二是引入第二强化相形成复合材料。例如,弥散强化无氧铜是典型的人工复合材料,常用的弥散质点有 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 Y_2O_3 、 ThO_2 等。

人工复合材料法是指人工向铜中加入第二相的颗粒、晶须或纤维对铜基体进行强化,通过向铜基中引入均匀分布的、细小的、具有良好热稳定的氧化物颗粒来强化铜而制得的材料。其第二相的组分一般在 1% 以下甚至低至 0.01%,但对材料的强化作用十分明显,尤其是大大提高材料的高温强度。例如,Cu-2.5% TiB_2 (体积分数),导电率为 76%IACS,抗拉强度为 675 MPa; Cu-0.5% Al_2O_3 (质量分数) 系列合金,材料的室温强度可达到 500 MPa ~ 800 MPa,导电率可达 85%IACS 以上,在 900 °C 烧氢后材料的强度仍达到 200 MPa ~ 400 MPa。

另一类发展较快的是原位复合材料（自生复合材料），原位复合材料是指在铜基体中，通过元素之间或元素与化合物之间发生放热反应生成增强体的一类复合材料。这类复合材料中的增强体没有界面污染，与基体有良好的界面相容性，与传统的人工外加增强体复合材料相比，其强度有大幅度的提高，同时保持较好的韧性和良好的高温性能。例如，Cu-20%Nb（体积分数）复合材料具有极高的抗拉强度，接近 2 000 MPa；Cu-18%Nb（质量分数）的导电率为 66.6%IACS，抗拉强度为 1 450 MPa；其他如 Cu-Fe、Cu-Ta 系复合材料也具有较高的高温强度和室温强度，材料的强度一般可达 800 MPa ~ 1500 MPa。

任务三 钛及钛合金

钛及钛合金是一种新型的结构材料，具有密度小、比强度高、耐高温、耐腐蚀以及低温韧性良好等优点，钛及钛合金在航空、航天、化工、导弹、舰艇等方面得到广泛的应用。

一、纯钛

纯钛是灰白色轻金属，钛的密度为 4.54 g/cm^3 ，熔点为 $1\,668\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。纯钛在固态下具有同素异构转变，在 $882.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下为密排六方晶格的 $\alpha\text{-Ti}$ ， $882.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上为体心立方晶格的 $\beta\text{-Ti}$ 。

纯钛塑性好、强度低，易于加工成形，可制成细丝和薄片；钛的化学性质极为活泼，与大气中 O_2 、 N_2 、 H_2 、 CO 、 CO_2 、水蒸气、氨气等产生强烈的化学反应，但其表面能生成一层致密的氧化膜，因而在大气和海水具有良好的耐蚀性；在硫酸、盐酸、硝酸、氢氧化钠等介质中都很稳定；钛的抗氧化能力要优于大多数奥氏体不锈钢。

纯钛中常见的杂质有 C、N、H、O、Fe、Mg 等元素，杂质的存在对钛的力学性能影响很大，少量的杂质能使钛的强度和硬度提高，塑性和韧性下降。例如，99.5% 工业纯钛的力学性能：抗拉强度 $R_m=539 \text{ MPa}$ ，伸长率 $A=25\%$ ，断面收缩率 $Z=25\%$ ，硬度 195 HBS。

纯钛的牌号以“TA”加顺序号表示，根据杂质的含量不同，工业纯钛有 TA1、TA2、TA3 三个牌号，顺序号越大，杂质含量越多，强度越高，塑性越差。

工业纯钛常用于制作 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下工作、强度要求不高的零件及冲压件，如热交换器、海水净化装置、阀门、飞机构架、船舰零件及医疗器械等。

二、钛合金

钛合金是以钛为基础加入铝、锡、铬、锰、钒、钼等元素组成的合金。钛合金具有密度低、比强度高、力学性能好、耐蚀性好、导热率低、无毒无磁、可焊接、生物相容性好、表面可装饰性强等特性，广泛应用于航空、航天、化工、石油、电力、医疗、建筑、体育用品等领域。另外，钛合金的加工性能差，切削加工困难；热加工时，非常容易吸收氢、氧、氮、碳等杂质；还有抗磨性差，生产工艺复杂等缺点。

根据室温下钛合金退火状态的组织，将钛合金分为三类： α 合金、 β 合金和 $(\alpha+\beta)$ 合金。 α 钛合金的代号为 TA， β 钛合金的代号为 TB， $(\alpha+\beta)$ 钛合金的代号为 TC。钛合金的牌号分别用 TA、TB、TC 加顺序号表示。如 TA7、TB2、TC4 等。

1. α 钛合金 (TA)

它是 α 相固溶体组成的单相合金，不论是在一般温度下还是在较高的实际应用温度下，均是 α 相，

组织稳定,耐磨性高于纯钛,抗氧化能力强;在 500 ℃~600 ℃的温度下,仍保持其强度和抗蠕变性能,但不能进行热处理强化,室温强度不高。典型牌号 Ti-5Al-2.5Sn (TA7),主要用于制造温度不超过 500 ℃的零件,如航空发动机压气机叶片和管道、导弹的燃料缸、超声速飞机的蜗轮机匣以及火箭、飞船的高压低温容器等。

2. β 钛合金 (TB)

它是 β 相固溶体组成的单相合金,未热处理即具有较高的强度;淬火、时效后合金得到进一步强化,室温强度可达 1 372 MPa~1 666 MPa;但热稳定性较差,不宜在高温下使用。典型牌号 Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al (TB2)。这类合金强度高,但冶炼工艺复杂,应用受到限制, β 钛合金主要用于 350 ℃以下工作的结构件和紧固件,如飞机压气机叶片、轴、弹簧、轮盘等。

3. ($\alpha+\beta$) 钛合金 (TC)

它是双相合金,具有优良的综合性能,组织稳定性好,有良好的韧性、塑性和高温变形性能,能较好地进行热压力加工,能进行淬火、时效使合金强化;热处理后的强度约比退火状态提高 50%~100%;高温强度高,可在 400 ℃~500 ℃的温度下长期工作,其热稳定性次于 α 钛合金;($\alpha+\beta$) 钛合金是低温和超低温的重要结构材料。典型牌号 Ti-6Al-4V (TC4),主要用于制造 400 ℃以下和低温工作的零件,如火箭发动机外壳、火箭和导弹的液氢燃料箱部件等。

三种钛合金中最常用的是 α 钛合金和 ($\alpha+\beta$) 钛合金; α 钛合金的切削加工性最好, ($\alpha+\beta$) 钛合金次之, β 钛合金最差。

钛合金按用途可分为耐热合金、高强合金、耐蚀合金(钛钼、钛钡合金等)、低温合金以及特殊功能合金(钛铁贮氢材料和钛镍记忆合金)等。

任务四 轴承合金

一、滑动轴承概述

机械设备中使用的轴承有滚动轴承和滑动轴承两种。虽然滚动轴承有很多优点,应用很广,但滑动轴承具有承压面积大、工作平稳、无噪声以及检修方便等优点,在船舶动力装置中被广泛应用,例如柴油机、增压器、空气压缩机、轴系、锚机及绞缆机等轴承均为滑动轴承。

滑动轴承是机器设备中对旋转轴起支撑作用的重要部件,由轴承体和轴瓦两部分组成,滑动轴承的结构如图 7-7 所示。当轴旋转时,轴和轴瓦之间有着强烈的摩擦,受到周期性交变载荷的作用并产生冲击振动,因此,选择合适的轴瓦材料相当重要。

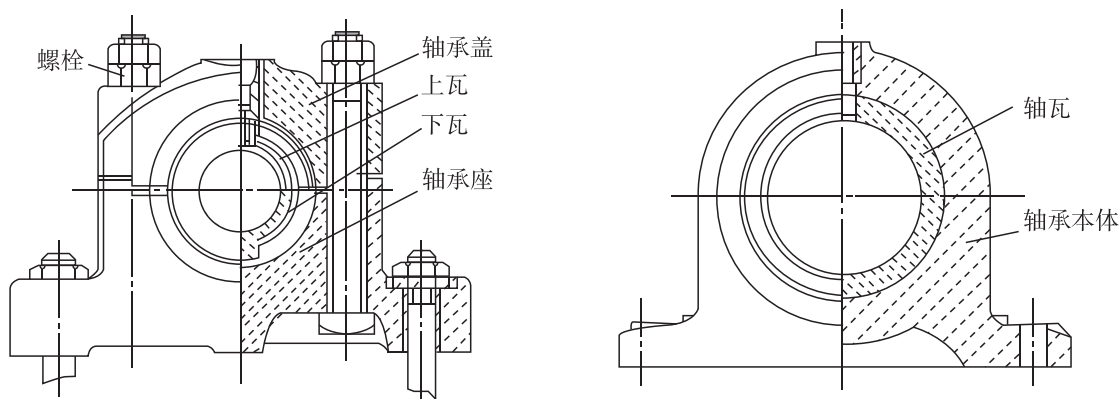


图 7-7 滑动轴承的结构

滑动轴承对轴瓦材料的摩擦性能和加工精度要求都较高，工艺复杂且价格贵。因此在滑动轴承设计中，常将轴瓦与轴承座分开加工，轴瓦内部常开有油腔、油槽以保证润滑剂能更好地分布于承载面上。常用的轴瓦结构如图 7-8 所示。

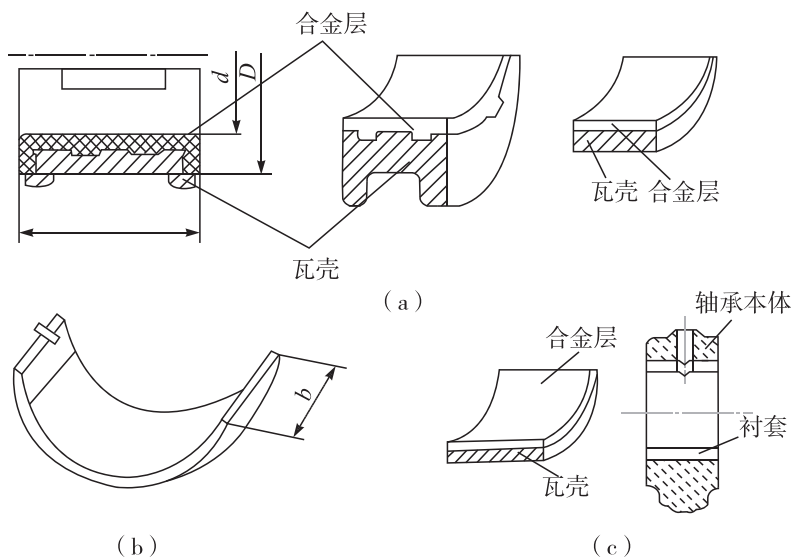


图 7-8 常用的轴瓦的结构

(a) 两半式后壁轴瓦示意图；(b) 两半式薄壁轴瓦示意图；(c) 整体式轴瓦示意图

图 7-8 (a) 所示的上、下轴瓦均由瓦壳与瓦衬组成，厚壁轴瓦的厚度大于 $0.064D$ (D 为轴径)，合金层厚度为 $0.75 \sim 2 \text{ mm}$ 。瓦壳材料主要是低碳钢，耐磨合金多采用巴氏合金。这种轴瓦主要用于中、低速船用柴油机的主轴承、曲柄销轴承和十字头轴承等。

图 7-8 (b) 所示的轴瓦由瓦壳和合金瓦衬组成，轴瓦厚度一般为 $0.02 \sim 0.065D$ (D 为轴径)，合金层厚度为 $0.2 \sim 0.7 \text{ mm}$ 。瓦壳材料一般为低碳钢，耐磨合金可用巴氏合金、铜基轴承合金或铝基轴承合金。这种轴瓦主要用于中、高速柴油机的轴承。

图 7-8 (c) 所示为整体式铜基轴承合金轴瓦，该轴瓦由钢壳与铅青铜耐磨合金制成，这种轴瓦的轴需从轴瓦的一端插入，拆装不便，主要用于筒状活塞式柴油机连杆小端轴瓦和摇臂轴瓦。

二、对轴承合金的性能和组织要求

在滑动轴承中，制造轴瓦及其内衬的合金称为轴承合金。当轴高速旋转时，轴瓦与轴颈发生强烈的

摩擦，并承受轴颈施加的交变载荷和冲击力。因此，轴承合金应具备一定的性能和组织要求。

1. 对轴承合金的性能要求

- (1) 足够的强度和硬度，以承受轴颈施加的交变冲击载荷。
- (2) 足够的塑性和韧性，较高的抗疲劳强度，以承受交变载荷带来的冲击和振动。
- (3) 较小的摩擦系数，良好的耐磨性，以减少轴颈的磨损。
- (4) 较小的热膨胀系数，良好的导热性和耐蚀性，以防止摩擦升温而发生咬合。
- (5) 良好的磨合能力，使其与轴能较快地紧密配合。
- (6) 良好的工艺性，易于铸造和切削加工。

2. 轴承合金的组织特点

根据对轴承合金的性能要求，轴承合金的组织特点应是在软的基体上分布硬质点或在硬的基体上分布软质点，轴承合金的组织如图 7-9 所示。

图中轴承合金的组织是软基体上分布硬质点，当轴运转时，软基体受磨损而凹陷，硬质点将凸出于基体上，使轴和轴瓦的接触面积减小，而凹坑能储存润滑油，降低轴和轴瓦之间的摩擦，减小轴和轴承的磨损。另外，软基体能承受冲击和振动，使轴和轴瓦很好地结合，并能嵌藏外来小的硬物以保证轴颈不被擦伤。但这类组织难以承受高的载荷，属于这类组织的轴承合金有锡基合金和铅基合金，又称为巴氏合金。

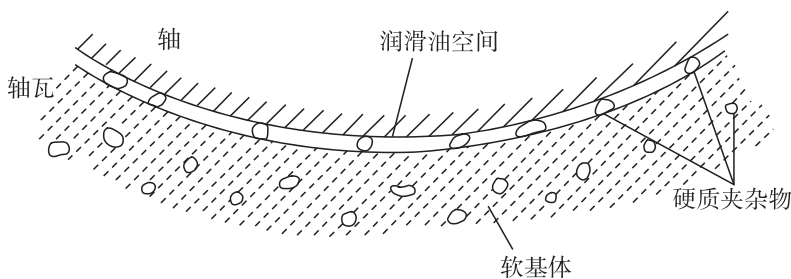


图 7-9 轴承合金的组织

当轴承合金的组织是硬基体上分布软质点时，也可以达到上述同样的目的。高速重载轴承首先要保证有足够的承载能力，这就要求轴承有较硬的基体（硬度低于轴的轴颈）组织来提高单位面积上能够承受的压力。这类组织也具有低的摩擦系数，但其磨合性较差，属于这类组织的轴承合金有铜基合金和铝基合金。

三、常用轴承合金

常用轴承合金有巴氏合金、铜基轴承合金和铝基轴承合金。最早的轴承合金是 1839 年美国人艾萨克·巴比特 (I.Babbitt) 发明的锡基轴承合金 (Sn-7.4Sb-3.7Cu)，以及随后研制成的铅基合金，因此，通常称锡基和铅基轴承合金为巴比特合金（或巴氏合金），巴比特合金呈白色，又常称“白合金”。

巴氏合金的牌号表示方法：“铸”字的汉语拼音首字母“Z”+基本元素+主加元素符号+主加元素质量分数+辅加元素符号+辅加元素质量分数。如轴承合金 ZSnSb11Cu6 ，表示基本元素为 Sn，主加元素为 11% 的 Sb 和辅加元素为 6% 的 Cu，其余为基本元素 Sn 的质量分数。

1. 锡基轴承合金

锡基轴承合金是以 Sn 为基本元素，并加入 Sb、Cu 等元素组成的合金，是软基体上分布硬质点组织

结构的轴承合金。其优点是具有良好的塑性、导热性和耐蚀性，而且摩擦系数和膨胀系数小，广泛用于重型动力机械如汽轮机、涡轮机和内燃机等大型机器的高速轴瓦；缺点是耐热性差、有偏析现象和疲劳强度低。工作温度不高于 150 ℃，当工作温度超过 110 ℃时，疲劳强度降低一半左右。这种轴承合金价格较贵，锡基轴承合金的典型牌号有 ZSnSb11Cu6、ZSnSb12Pb10Cu4。常用锡基轴承合金的牌号及化学成分如表 7-8 所示。

表 7-8 常用锡基轴承合金的牌号及化学成分

合金 牌号	化学成分 (质量分数) /%														
	主要元素							杂质元素 (≤)							
	Sb	Pb	Cu	Ni	As	Cd	Sn	Pb	Zn	Al	Fe	Bi	As	Cd	其他元素 总和
ZSnSb12 Pb10Cu4	11.0 ~ 13.0	9.0 ~ 11.0	2.5 ~ 5.0	—	—	—	余量	—	0.01	0.01	0.1	0.08	0.1	—	0.50
ZSnSb12 Cu6Cd1	11.0 ~ 13.0	—	5.5 ~ 6.8	0.3 ~ 0.6	0.4 ~ 0.7	1.1 ~ 1.6	余量	0.15	0.05	0.05	0.1	—	—	—	0.50 且 Fe+Al+ Zn ≤ 0.15
ZSnSb11 Cu6	10.0 ~ 12.0	—	5.5 ~ 6.5	—	—	—	余量	0.35	0.01	0.01	0.1	0.08	0.1	—	0.50
ZSnSb8 Cu4	7.0 ~ 8.0	—	3.0 ~ 4.0	—	—	—	余量	0.35	0.005	0.005	0.1	0.08	0.1	—	0.50
ZSnSb4 Cu4	4.0 ~ 5.0	—	4.0 ~ 5.0	—	—	—	余量	0.35	0.01	0.01	—	0.08	0.1	—	0.50
ZSnSb9 Cu7	8.0 ~ 9.5	—	7.5 ~ 8.5	—	—	—	余量	0.35	0.005	0.005	0.08	0.08	0.1	0.05	0.50
ZSnSb8 Cu8	7.5 ~ 8.5	—	7.5 ~ 8.5	—	—	—	余量	0.35	0.005	0.005	0.08	0.08	0.1	0.05	0.50

2. 铅基轴承合金

铅基轴承合金是以 Pb 为基本元素，并加入 Sb、Sn、Cu 等元素组成的合金，也是软基体上分布硬质点组织结构的轴承合金。铅基巴氏合金具有较好的抗压强度、耐磨性、嵌藏性，价格便宜，但其强度、韧性、耐蚀性和导热性较差，性能不如锡基巴氏合金。一般用于制造低速、中载且冲击不大的机器轴承，如船舶辅机的压缩机、起货机、锚机等轴承。铅基轴承合金的典型牌号有 ZPbSb16Sn16Cu2。常用铅基轴承合金的牌号及化学成分如表 7-9 所示。

表 7-9 常用铅基轴承合金的牌号及化学成分

合金牌号	化学成分 (质量分数) /%													
	主要元素						杂质元素 (≤)							
	Sn	Sb	Cu	As	Cd	Pb	Cu	Zn	Al	Fe	Bi	As	Cd	其他元素总和
ZPbSb16Sn16Cu2	15.0 ~ 17.0	15.0 ~ 17.0	1.5 ~ 2.0	—	—	余量	—	0.15	—	0.1	0.1	0.3	—	0.60
ZPbSb15Sn5 Cu3Cd2	5.0 ~ 6.0	14.0 ~ 16.0	2.5 ~ 3.0	0.6 ~ 1.0	1.75 ~ 2.25	余量	—	0.15	—	0.1	0.1	—	—	0.40
ZPbSb15Sn10	9.0 ~ 11.0	14.0 ~ 16.0	—	—	—	余量	0.7	0.005	0.005	0.1	0.1	0.6	0.05	0.45
ZPbSb15Sn5	4.0 ~ 5.5	14.0 ~ 15.5	0.5 ~ 1.0	—	—	余量	—	0.15	0.01	0.1	0.1	0.2	—	0.75
ZPbSb10Sn6	5.0 ~ 7.0	9.0 ~ 11.0	—	—	—	余量	0.7	0.005	0.005	0.1	0.1	0.25	0.05	0.70
ZPbSb16Sn1As1	0.8 ~ 1.2	14.5 ~ 17.5	—	0.8 ~ 1.4	—	余量	0.6	0.005	0.005	0.1	0.1	—	—	0.45

3. 铜基轴承合金

铜基轴承合金是一种常用的轴承材料，主要有铅青铜、锡青铜和铝青铜等。

(1) 铅青铜。铅青铜中 ZCuPb30 是典型的铜基轴承合金材料，组织结构是在硬的基体上分布着软质点。铅青铜具有较高的疲劳强度和较大的承载能力、优良的导热性、较高的工作温度 (250 ℃)、较低的摩擦系数和较高的耐磨性，但耐蚀性、磨合性、嵌藏性及抗咬合性等均低于巴氏合金。铅青铜适宜制造高速、高载及冲击载荷的重要轴承，如高速大功率柴油机的主轴承、连杆轴承等。

(2) 锡青铜。锡青铜 ZCuSn10P1 具有较高的强度和疲劳强度、优良的耐磨性、良好的稳定性，工作温度可达 280 ℃，在大气、淡水中有良好的耐蚀性，但偏析倾向大。常用作高速、高载柴油机轴承，并制成整体衬套式轴承。锡青铜 ZCuSn6Zn6Pb3 和 ZCuSn5Zn5Pb5 具有良好的耐磨性和铸造性、较高的强度和疲劳强度、良好的切削加工性，工作温度达 280 ℃，在大气和淡水中有良好的耐蚀性。常用于制造中高载荷、中速柴油机的轴承和减速器、起重机及机床轴承。常用铜基轴承合金的牌号及化学成分如表 7-10 所示。

表 7-10 常用铜基轴承合金的牌号及化学成分

合金牌号	化学成分 (质量分数) /%									
	主要元素									
	Sn	Pb	Zn	Al	Ni	Mn	Fe	Bi	P	Cu
ZCuSn5Pb5 Zn5	4.0 ~ 6.0	4.0 ~ 6.0	4.0 ~ 6.0	—	—	—	—	—	—	余量
ZCuSn10P1	9.0 ~ 11.5	—	—	—	—	—	—	—	0.8 ~ 1.1	余量
ZCuPb10 Sn10	9.0 ~ 11.0	8.0 ~ 11.0	—	—	—	—	—	—	—	余量
ZCuPb9Sn5	4.0 ~ 6.0	8.0 ~ 10.0	—	—	—	—	—	—	—	余量
ZCuPb15 Sn8	7.0 ~ 9.0	13.0 ~ 17.0	—	—	—	—	—	—	—	余量
ZCuPb20 Sn5	4.0 ~ 6.0	18.0 ~ 23.0	—	—	—	—	—	—	—	余量
ZCuSn10 Pb5	9.0 ~ 11.0	4.0 ~ 6.0	—	—	—	—	—	—	—	余量
ZCuPb17 Sn4Zn4	3.5 ~ 5.0	14.0 ~ 20.0	2.0 ~ 6.0	—	—	—	—	—	—	余量
ZCuPb30	—	27.0 ~ 33.0	—	—	—	—	—	—	—	余量
ZCuAl10 Fe3	—	—	—	8.5 ~ 11.0	—	—	2.0 ~ 4.0	—	—	余量
ZCuAl9Fe4 Ni4Mn2	—	—	—	8.5 ~ 10.0	4.0 ~ 5.0	0.8 ~ 2.5	4.0 ~ 5.0	—	—	余量

续表

合金牌号	化学成分 (质量分数) /%												
	杂质元素 (≤)												
	Sn	Pb	Zn	Al	Sb	Ni	Mn	Si	Fe	P	Bi	其他	其他元素总和
ZCuSn5Pb5 Zn5	—	—	—	0.01	0.25	2.50	—	0.01	0.30	0.05	—	S0.10	0.70
ZCuSn10P1	—	0.25	0.05	0.01	0.05	0.10	0.05	0.02	0.10	—	0.005	S0.05	0.70
ZCuPb10 Sn10	—	—	2.00	0.01	0.50	2.00	0.20	0.01	0.25	0.05	0.005	S0.10	1.00
ZCuPb9Sn5	—	—	2	—	0.50	2	—	—	—	—	—	—	1.00
ZCuPb15 Sn8	—	—	2.00	0.01	0.50	2.00	0.20	0.01	0.25	0.10	—	S0.10	1.00
ZCuPb20 Sn5	—	—	2.00	0.01	0.75	2.50	0.20	0.01	0.25	0.10	—	S0.10	1.00
ZCuSn10 Pb5	—	—	1.00	0.02	0.30	—	—	—	0.30	0.05	—	—	1.00
ZCuPb17 Sn4Zn4	—	—	—	0.05	0.30	—	—	0.02	0.40	0.05	—	—	0.75
ZCuPb30	1.00	—	—	0.01	0.20	—	0.30	0.02	0.50	0.08	0.005	As0.10	1.00
ZCuAl10 Fe3	0.30	0.20	0.40	—	—	3.00	1.00	0.20	—	—	—	—	1.00
ZCuAl9Fe4 Ni4Mn2	—	0.02	—	—	—	—	—	0.15	—	—	—	C0.1	1.00

4. 铝基轴承合金

铝基轴承合金是在 20 世纪 60 年代发展起来的轴承合金,是近代汽车、拖拉机、航海、航空发动机等高速、高压、重载下工作的新型滑动轴承合金。铝基轴承合金的特点是原料丰富,价格便宜,密度小,导热性好,疲劳强度高,能承受较大压力,并且具有高温硬度,优良的耐腐蚀性和减摩性,适合用于高速、高负荷下工作的轴承。但其膨胀系数较大,运转时容易与轴咬合,尤其是启动时危险性更大。我国已逐步用来代替巴氏合金与铜基轴承合金。常用的铝基轴承合金有低锡铝轴承合金、铝镉镁轴承合金和高锡铝轴承合金等。

(1) 低锡铝轴承合金。含 Sn 小于 10%, 并含 Cu、Mg、Ni 及大量 Al 的轴承合金。具有承载能力强、疲劳强度高、减摩性差的特点,用于中高速、重载的轴承。

(2) 铝镉镁轴承合金。含 Sb 3.5% ~ 5.5%、Mg 0.3% ~ 0.7%, 其余为铝。组织结构为在铝的软基体上分布着 AlSb 化合物硬质点,该合金具有高的疲劳强度和耐磨性、耐蚀性,但承载能力不强,用于低速、中载的轴承,如农机、拖拉机的轴承等。

(3) 高锡铝轴承合金。铝和锡在固态下几乎不溶解,20 高锡铝轴承合金含 Sn 20%、Cu1%, 其余为 Al。组织结构为在硬的铝基体上分布着粒状锡的软质点,Cu 溶于 Al 可强化基体。具有承载能力强,疲

劳强度高，耐热性、耐磨性和耐蚀性良好，切削加工性好和成本低等优点，可代替巴氏合金等轴承材料。广泛用于高负荷的中、高速船用柴油机主轴承和连杆轴承，也用于汽车、拖拉机的轴承上。铝基轴承合金的牌号、轴瓦结构、性能及用途如表 7-11 所示。

表 7-11 铝基轴承合金的牌号、轴瓦结构、性能及用途

合金牌号	轴瓦结构	硬度 / HV	表面涂层	应用场合
Al20Sn1Cu	双金属	35	无	低载荷
Al40Sn1Cu	双金属	30	无	低载荷
Al8Sn2Pb2.5Si0.8Cu0.2Cr	双金属，无过渡层	40	无	中低载荷
Al12Sn4Si1Cu	双金属	45	无	中低载荷
Al4Si0.5Cu0.5Mg	三金属	70	Pb10Sn3Cu 合金	中低载荷
Al6.5Sn1Cu0.5Ni	三金属	40	Pb18Sn2Cu 无镍栅	高载荷
Al6.5Sn1Cu0.5Ni	三金属	40	含 MoS ₂ 的树脂涂层	赛车发动机轴瓦
Al6.5Sn1Cu0.5Ni	整体轴瓦	40	无	止推片
Al11Si1Mg1CuNi	整体轴瓦	100	Pb18Sn2Cu 含镍栅	小端衬套
Al4.5ZnPb1Cu0.5Mg	三金属	55	Al20Sn 含镍栅	高载荷连杆轴瓦

为进一步改善 20 高锡铝轴承合金的性能，目前已将锡含量增至 30% ~ 40%。但锡含量增大会导致合金疲劳强度下降；40 高锡铝轴承合金的疲劳强度已与巴氏合金相近，用于船用大型低速柴油机的十字头轴承。各种常用轴承合金的性能比较如表 7-12 所示。

表 7-12 各种常用轴承合金的性能比较

种类	抗咬合性	磨合性	磨蚀性	耐疲劳性	合金硬度 HBS	轴颈处硬度 HBS	最大允许压力 / (N · mm ⁻²)	最大允许温度 / °C
锡基巴氏合金	优	优	优	劣	20 ~ 30	150	600 ~ 1000	150
铅基巴氏合金	优	优	中	劣	15 ~ 30	150	600 ~ 800	150
锡青铜	中	劣	优	优	50 ~ 100	300 ~ 400	700 ~ 2000	200
铅青铜	中	差	差	良	40 ~ 80	300	2000 ~ 3200	220 ~ 250
铝基合金	劣	中	优	良	45 ~ 50	300	2000 ~ 2800	100 ~ 150
铸铁	差	劣	优	优	160 ~ 180	200 ~ 250	300 ~ 600	150

任务五 粉末冶金

粉末冶金是指用几种金属粉末或金属与非金属粉末作原料，通过压制成型后，经高温烧结而制成合金材料的工艺。粉末冶金常用于其他生产工艺无法制造或难以制造的零件和材料，如硬质合金、高熔点材料、结构材料、金属陶瓷、复合材料、多孔材料、磁性材料和耐热材料等。下面重点介绍粉末冶金中的硬质合金材料。

一、金属陶瓷硬质合金

金属陶瓷硬质合金是采用高硬度和高熔点的碳化物粉末和黏结剂金属混合，通过粉末冶金工艺制成的一种合金材料。

金属陶瓷硬质合金硬度很高，常温下硬度可达 86 ~ 93 HRA（相当于 69 ~ 81 HRC），具有很高的耐热性，热硬性可达 900 ℃ ~ 1 000 ℃。金属陶瓷硬质合金刀具的切削速度比高速钢刀具高 4 ~ 7 倍，刀具寿命提高 5 ~ 80 倍，可切削 50 HRC 左右的硬质材料。金属陶瓷硬质合金的耐蚀性和抗氧化性良好，线膨胀系数小，导热性差；抗压强度高，抗弯强度低，脆性大，韧性差。金属陶瓷硬质合金不能进行锻造及切削加工，也不需要热处理，难以制成形状复杂的整体刀具，因而常制成不同形状的刀片，采用焊接、粘接、机械夹持等方法安装在刀体或模具体上使用。

金属陶瓷硬质合金广泛用作刀具材料，如车刀、铣刀、刨刀、钻头、镗刀等，用于切削铸铁、有色金属、塑料、化纤、石墨、玻璃、石材和普通钢材，也可以用来切削耐热钢、不锈钢、高锰钢、工具钢等难加工的材料。金属陶瓷硬质合金还可用来制作凿岩工具、采掘工具、钻探工具、测量量具、耐磨零件、金属磨具、气缸衬里、精密轴承、喷嘴、五金模具等。

金属陶瓷硬质合金按其成分和性能特点分为三类：钨钴类硬质合金、钨钛钴类硬质合金和钨钛钽（铌）类硬质合金。

1. 钨钴类硬质合金 (WC+Co)

钨钴类硬质合金主要由碳化钨（WC）和黏结剂钴（Co）组成，其牌号由“硬、钴”两字的汉语拼音首字母“YG”和平均含钴量的百分数组成。例如，YG8 表示平均含钴量为 8%，其余为碳化钨平均含量的硬质合金。牌号后加注 C、X、H 分别表示粗、中细、超细的 WC 颗粒；A 为含有少量的 TaC 合金；N 为含有少量的 NbC 合金。

在钨钴类硬质合金中，碳化物是合金的骨架，起坚硬耐磨作用；钴起黏结作用，同时影响韧性。随着牌号中钴的质量分数的增加，硬质合金的硬度下降、抗弯强度增加；当钴的质量分数相同时，WC 的粒度越细，硬度越高；加入 TaC 及 NbC 后，钨钴类硬质合金的高温硬度、强度及抗氧化性有提高。

YG 类合金适宜加工如铸铁、非铁金属及其合金、胶木和其他非金属材料。同类合金中含钴量高的合金用于粗加工，含钴量低的合金用于精加工。细晶粒的 YG 类硬质合金如 YG3X、YG6X 等，在含钴量相同时，其硬度耐磨性比 YG3、YG6 高，强度和韧性稍差，适用于加工冷硬铸铁、奥氏体不锈钢、耐热合金、硬青铜等。

硬质合金也用于制造冷作模具，如冷拉模、冷冲模、冷挤压模和冷镦模等。其中 YG 类适用于拉深模，YG6、YG8 适用于小拉深模，YG15 适用于大拉深模和冲压模具。硬质合金还用于制造量具和耐磨零件，如千分尺的测量头、车床顶件尖、精轧辊和无心磨床的导板等。

根据 GB/T 2075—2007 规定，钨钴类硬质合金相当于 K 类（红色）硬质合金，其代号有 K01、K10、K20、K30 等，数字越大，耐磨性越低，韧性越大。

常用钨钴类硬质合金的牌号、化学成分、力学性能及用途如表 7-13 所示。

表 7-13 常用钨钴类硬质合金的牌号、化学成分、力学性能及用途

牌号	化学成分 /%			力学性能		用途
	ω_{WC}	$\omega_{TiC}(\omega_{NbC})$	ω_{Co}	抗弯强度 /MPa	硬质 /HRC	
YG3	96.5	<0.5	3	1 200	91.0	适用于铸铁和非铁金属的精、半精车加工

续表

牌号	化学成分 /%			力学性能		用途
	ω_{WC}	$\omega_{TiC}(\omega_{NbC})$	ω_{Co}	抗弯强度 /MPa	硬质 /HRC	
YG3X	96.5	—	3	1 100	93	铸铁和非铁金属及其合金的精镗、精车，亦可用于钢材及钨钼材料的拉丝模
YG6	94	—	6	1 450	89.5	适用于铸铁、非铁金属及合金的粗、半精、精车加工
YG6X	93.5	<0.5	6	1 400	91.0	可用于加工冷硬铸铁、耐热合金钢、普通铸铁的精加工
YG8	92	—	8	1 500	98.0	适用于铸铁、非铁金属及非金属材料粗加工
YG8C	92	—	8	1 750	88.0	可用于耐热钢、奥氏体不锈钢的粗加工
YG11	89	—	11	1 800	88	可用于强度、冲击韧性较高的耐磨件及工具，亦可加工难加工的特殊钢材
YG15	85	—	15	2 100	87	用于冲压模具，钢棒、钢管的拉伸模
YG20	80	—	20	2 800	85.5	用于冲击大的冲压工具
YG6A	91	3.0	6	1 500	91.5	适用于冷硬铸铁、非铁金属、球墨铸铁及高锰钢、耐热钢的半精加工和精加工

2. 钨钛钴类硬质合金 (WC+TiC+Co)

钨钛钴类硬质合金主要由碳化钨 (WC)、碳化钛 (TiC) 及钴 (Co) 组成。其牌号由“硬、钛”两字汉语拼音首字母“YT”和碳化钛平均含量的百分数组成。例如，YT15 表示 TiC 的平均含量为 15%，其余为碳化钨和钴平均含量的硬质合金。随着合金牌号数字的增大，TiC 的质量分数的增加，硬质合金的硬度提高。由于 TiC 的硬度和熔点均比 WC 高，所以和 YG 类硬质合金相比，其硬度、耐磨性、红硬性增大，黏结温度高，抗氧化能力强，而且在高温下会生成 TiO₂ 减少黏结。但合金的导热性能较差，抗弯强度低，所以 YT 类硬质合金适宜加工钢材等塑性材料。

根据 GB/T 2075—2007 规定，钨钛钴类硬质合金相当于 P 类 (蓝色) 硬质合金，其代号有 P01、P10、P20、P30、P40、P50 等，数字越大，耐磨性越低，韧性越大。

常用钨钛钴类硬质合金的牌号、化学成分、力学性能及用途如表 7-14 所示。

表 7-14 常用钨钛钴类硬质合金的牌号、化学成分、力学性能及用途

牌号	化学成分 /%			力学性能		用途
	ω_{WC}	$\omega_{TiC}(\omega_{NbC})$	ω_{Co}	抗弯强度 /MPa	硬质 /HRC	
YT5	85	5	10	1 400	89	适用于碳钢和合金钢粗、半精加工
YT14	78	14	8	1 200	90.5	适用于碳钢和合金钢的粗、半精、精加工
YT15	79	15	6	1 150	91	适用于碳钢和合金钢的粗、半精、精加工
YT30	66	30	4	900	92.5	适用于碳钢和合金钢的精加工

3. 钨钛钽 (铌) 类硬质合金 [WC+TiC+TaC (NbC) +Co]

钨钛钽 (铌) 类硬质合金主要由碳化钨、碳化钛、碳化钽 (或碳化铌) 及钴组成，这类硬质合金又称通用硬质合金或万能硬质合金，其牌号由“硬”“万”两字汉语拼音首字母“YW”加顺序号组成，如 YW1、YW2 等。在 YT 类硬质合金的基础上添加 TaC 或 NbC，提高了抗弯强度、冲击韧性、高温硬度、

抗氧能力和耐磨性，既可以加工钢材，又可以加工铸铁及有色金属。因此常称为通用硬质合金或万能硬质合金。YW 类硬质合金主要用来加工耐热钢、高锰钢、不锈钢等难加工材料。

根据 GB/T 2075—2007 规定，钨钛钽（铌）类硬质合金相当于 M 类（黄色）硬质合金，其代号有 M10、M20、M30、M40 等，数字越大，耐磨性越低，韧性越大。

二、碳化钛基类硬质合金

碳化钛基类硬质合金的主要成分是 TiC，有时也可以加入少量的 WC，以镍、钼作为黏结剂。由于 TiC 的质量分数的增大，因而硬度在硬质合金中最高，牌号用 YN（N 表示不含钴的镍、钼作为黏合剂的合金）表示，主要用于淬火钢的精加工。

三、钢结硬质合金

钢结硬质合金是以钢为黏结相，以难熔金属碳化物（碳化钛或碳化钨）作为硬质相，用粉末冶金方法制备的合金材料。钢结硬质合金经退火后，可进行切削加工，经淬火、回火后，有相当于硬质合金的高硬度和耐磨性、一定的耐热、耐蚀和抗氧化性，也可焊接和锻造，适用于制造形状复杂的刀具（如麻花钻、铣刀等）、模具和耐磨件。

钢结硬质合金从硬质相的组成可以分为碳化钨基钢结硬质合金和碳化钛基钢结硬质合金；从黏结相的最终组织可以分为马氏体、奥氏体、铁素体基钢结硬质合金；从机械加工性能又可分为不可机械加工和可机械加工钢结硬质合金。

钢结硬质合金的主要性能介于钢和硬质合金之间，它兼有两种材料的特点和长处，是填补了它们之间空白的一种新兴工程材料。和钢材相比，它具有钢材无法比拟的高硬度，高耐磨性和淬透性，这是由其材质结构的特殊性和硬质相所独有的特点决定的；同时它还具有与钢材相近的可机械加工、可热处理和可焊接的优点，这些性能特点也是一般硬质合金所不具备的。因此，也可以把钢结硬质合金称为可加工、可热处理的硬质合金。常用通用类硬质合金、碳化钛基类硬质合金和钢结硬质合金的牌号、化学成分、力学性能和用途如表 7-15 所示。

表 7-15 常用通用类、碳化钛基类、钢结类硬质合金的牌号、化学成分、力学性能和用途

类别	牌号	化学成分 /%				力学性能		用途
		ω_{WC}	ω_{TiC}	ω_{Co}	$\omega_{其他}$	抗弯强度 /MPa	硬质 /HRC	
通用类	YW1	84	6	6	$\omega_{TaC}: 4$	1 200	91.5	适用于耐热钢、高锰钢、不锈钢、铸铁的加工
	YW2	82	6	8	$\omega_{TaC}: 4$	1 350	90.5	适用于耐热钢、高锰钢、不锈钢、铸铁的加工，耐磨性稍次于 YW1，强度、韧性高于 YW1
TiC 基类	YN10	15	62	—	$\omega_{Ni}: 2$	1 100	92.0	与 YT30 基本相同，可用于淬火钢的精加工
					$\omega_{Mo}: 10$			
					$\omega_{TaC}: 1$			
钢结类	GT35 (YE65)	—	35	—	$\omega_C: 0.6$	1 373 ~ 1 765	69 ~ 73	用于各种冷作模具、量具及其他工具，在某些条件下比普通硬质合金还好，可锻造、热处理及机械加工

续表

类别	牌号	化学成分 /%				力学性能		用途
		ω_{WC}	ω_{TiC}	ω_{Co}	$\omega_{其他}$	抗弯强度 /MPa	硬质 /HRC	
钢结类	GT35 (YE65)	—	35	—	ω_{Mo} : 2.0	1 373 ~	69	用于各种冷作模具、量具及其他工具,在某些条件下比普通硬质合金还好,可锻造、热处理及机械加工
					ω_{Cr} : 2.0		~	
					ω_{Fe} : 余量	1 765	73	
	GW50 (YE50)	50	—	—	ω_C : 0.8	1 667 ~	68	
					ω_{Mo} : 0.3		~	
					ω_{Cr} : 1.1	2 260	72	
					ω_{Fe} : 余量			

钢结硬质合金具有良好的物理机械性能,它本身在硬化状态下具有很高的硬度,其耐磨性与高钴硬质合金相当,甚至更高(但材料强度和耐冲击性较一般硬质合金高)。这是由于它含有较高(35%~50%)的硬质相 TiC,同时也由于呈圆形的 TiC 晶粒在工作时与工件表面形成滚动摩擦系数,从而避免黏附磨损和擦伤磨损,使之具有高耐磨性和较小的破坏性。钢结硬质合金还具有较小的比重(碳化钛系钢结硬质合金一般比钢铁轻)、较高的比强度、良好的自润滑性、高阻尼特性与固有的频率(具有优异的消震效果)。

钢结硬质合金还具有优异的化学稳定性,能耐一定的高温、有较好的抗氧化、抗腐蚀性。其抗腐蚀性取决于黏结相的成分,不同成分具有不同的抗腐蚀性。

钢结硬质合金综合了钢和硬质合金各自的特点,构成了自己独特的综合性能优势。这种优异的综合性能,使得它在工模具材料、耐磨及减振零件、耐高温及耐腐蚀构件、冲击及破碎工具、刃具、量卡具等测量仪器,以及国防军工材料、航海、航空航天材料等对材料比重和综合性能有特殊要求的领域有着广阔的应用前景。

项目检测

第一部分 知识检测

一、填空题

- 纯铜具有()晶格,塑性()、强度()、耐蚀性能()。
- 工业上使用的纯铜,其牌号有()、()和()三种,顺序号越大,杂质含量越()。
- 铜合金根据化学成分的不同,可分为()、()和()三类。Cu-Zn 合金一般称为(),而 Cu-Sn 合金一般称为()。
- H68 表示含铜()%、含锌()%的()黄铜。
- 根据钛合金在退火状态的相组成可分为()型、()型和()型钛合金,分别以()、()、()表示。
- 金属钛具有同素异构现象,882.5 °C 以下为()晶格,称为();882.5 °C 以上为()晶格,称为()。

二、单项选择题

- 紫铜具有()晶格。
A. 体心立方 B. 面心立方 C. 密排六方 D. 复杂斜方

2. 船用中、高速柴油机活塞材料常选用 ()。
 - A. 灰口铸铁
 - B. 铝合金
 - C. 球墨铸铁
 - D. 铸钢
3. 黄铜产生的季裂和脱锌的实质都是 ()。
 - A. 腐蚀
 - B. 化学腐蚀
 - C. 电化学腐蚀
 - D. 穴蚀
4. 以下为铸造铅青铜的是 ()。
 - A. $ZSnSb11Cu6$
 - B. $ZPbSb15Sn5Cu3Cd2$
 - C. $ZCuSn10Pb5$
 - D. $ZCuPb30$
5. HPb59-1 表示 ()。
 - A. 灰铸铁
 - B. 铅黄铜
 - C. 铅青铜
 - D. 锡青铜
6. 锡青铜中加入少量的合金元素磷, 其目的是 ()。
 - A. 提高耐磨性和改善切削加工性
 - B. 缩小结晶温度范围, 改善铸造性
 - C. 提高耐磨性、流动性和脱氧等
 - D. 细化组织, 提高机械性能
7. 紫铜和铝黄铜管的使用温度一般不超过 ()。
 - A. 200°C
 - B. 260°C
 - C. 300°C
 - D. 350°C
8. 适于高温用途的特殊青铜管的使用温度一般不超过 ()。
 - A. 200°C
 - B. 260°C
 - C. 300°C
 - D. 350°C
9. $ZCuSn10P1$ 铸造锡青铜, 加入 10% 的锡是为了提高 ()。
 - A. 减摩性
 - B. 耐热性
 - C. 耐磨性
 - D. 耐蚀性
10. 普通黄铜代号由“H+ 数字”组成, 其中数字表示 ()。
 - A. 平均含锌量
 - B. 平均含铜量
 - C. 平均含铅量
 - D. 平均抗拉强度
11. 铅青铜 $ZCuPb30$ 中, 铜的含量为 ()。
 - A. 30%
 - B. 50%
 - C. 70%
 - D. 90%
12. 下列牌号中, 属于单相普通黄铜的是 ()。

I. H59; II. H62; III. H68; IV. H92。

 - A. I + II
 - B. I + II + III
 - C. IV
 - D. III + IV
13. 轴承合金理想的组织结构为 ()。
 - A. 在软基体上分布着硬质点
 - B. 在硬基体上分布着软质点
 - C. 铁素体基体上分布着硬质点
 - D. 在软基体上分布着硬质点或在硬基体上分布着软质点
14. 关于锡基巴氏合金, 以下说法错误的是 ()。
 - A. 是软基体组织上分布着硬质点
 - B. 摩擦系数小, 具有良好的导热性和抗蚀性
 - C. 疲劳强度较高, 适于作中高速柴油机的主轴承
 - D. 有偏析现象
15. 下列合金中, () 被称为巴氏合金。
 - A. 铝基轴承合金
 - B. 铅基轴承合金
 - C. 铜基轴承合金
 - D. 锌基轴承合金
16. 关于巴氏合金的叙述, 不正确的是 ()。
 - A. 是软基体组织上分布着硬质点
 - B. 摩擦系数小, 导热性和抗蚀性好
 - C. 疲劳强度低
 - D. 无偏析现象

17. 轴承合金中, 允许工作温度最高的是 ()。
- A. 铅基巴氏合金 B. 锡基巴氏合金 C. 铅青铜 D. 铝基轴承合金
18. 在锡基巴氏合金中加入 6% 的铜, 其目的是 ()。
- A. 消除偏析 B. 消除枝晶偏析 C. 消除比重偏析 D. 消除晶内偏析
19. 下列轴承合金中, 属于在软基体上分布着硬质点轴承合金理想的结构为 ()。
- I. 锡基巴氏合金; II. 铅基巴氏合金; III. 铅青铜; IV. 锡青铜; V. 高锡铝合金。
- A. I + II + IV B. III + V C. I + II + III D. IV + V
20. 下列轴承合金中, 属于在硬基体上分布着软质点轴承合金理想的结构为 ()。
- I. 锡基巴氏合金; II. 铅基巴氏合金; III. 铅青铜; IV. 锡青铜; V. 高锡铝合金。
- A. I + II + IV B. III + V C. I + II + III D. IV + V
21. 下列不属于铜基轴承合金的是 ()。
- A. 铅青铜 B. 锡青铜 C. 铝青铜 D. 白铜
22. 下列铜基轴承合金中, 允许工作温度最高的是 ()。
- A. ZCuPb30 B. ZCuSn10-1 C. ZCuSn6-6-3 D. ZCuPb40
23. 铝基轴承合金主要包括低锡铝轴承合金、铝锶镁轴承合金和 ()。
- A. 铝合金 B. 铝硅合金 C. 中锡铝轴承合金 D. 高锡铝轴承合金
24. 关于 20 高锡铝轴承合金的叙述, 不正确的是 ()。
- A. 强度及疲劳强度高
B. 寿命长、加工性好、成本低
C. 耐热性和耐磨性好
D. 广泛应用于大型低速柴油机的主轴承和连杆轴承
25. 可替代 ZSnSb11Cu6 轴承合金, 用于低速柴油机主轴承的合金是 ()。
- A. 低锡铝轴承合金 B. 20 高锡铝轴承合金
C. 30 高锡铝轴承合金 D. 40 高锡铝轴承合金
26. () 广泛用于高负荷的中、高速船用柴油机主轴承和连杆轴承, 也用于汽车、拖拉机的轴承上。
- A. 低锡铝轴承合金 B. 20 高锡铝轴承合金
C. 30 高锡铝轴承合金 D. 40 高锡铝轴承合金
27. () 具有承载能力强、疲劳强度高、减摩性差的特点, 用于中高速重载的轴承。
- A. 低锡铝轴承合金 B. 20 高锡铝轴承合金
C. 30 高锡铝轴承合金 D. 40 高锡铝轴承合金
28. 锡青铜中加入少量的合金元素铅 ()。
- A. 用以提高耐磨性和改善切削加工性 B. 能够缩小结晶温度范围, 改善铸造性
C. 可提高耐磨性、流动性和脱氧等 D. 可细化组织, 提高机械性能
29. 某工件采用单相黄铜制造, 其强化工艺应该是 ()。
- A. 时效强化 B. 固溶强化 C. 形变强化 D. 热处理强化
30. 普通黄铜当含锌量达 () 时塑性最大, 含锌量达 45% 时强度最高。
- A. 30% B. 35% C. 40% D. 45%
31. BZn15-20 表示 ()。
- A. 含 15%Ni、20%Zn 的锌白铜 B. 含 15%Zn、20%Ni 的锌白铜

- C. 含 15%Mn、20%Zn 的锌白铜 D. 含 15%Zn、20%Mn 的锰白铜
32. HSn70-1 表示 ()。
- A. 主加元素 Sn 的含量为 29%、含铜量为 70%、其余为锌的特殊黄铜
B. 主加元素 Sn 的含量为 1%、含铜量为 70%、其余为锌的特殊黄铜
C. 主加元素 Zn 的含量为 1%、含铜量为 70%、其余为锡的特殊黄铜
D. 主加元素 Cu 的含量为 1%、含锌量为 70%、其余为锡的特殊黄铜
33. 关于黄铜的叙述, 不正确的是 ()。
- A. 黄铜是铜锌合金
B. 黄铜零件在大气、海水或有氨的介质中容易发生季裂
C. 黄铜易发生脱锌
D. 单相黄铜强度高
34. 锰黄铜中加工 1% 的铁, 用以 ()。
- A. 细化组织, 提高机械性能 B. 提高耐热性
C. 提高耐磨性 D. 提高耐蚀性
35. YG8 硬质合金, 牌号中的数字 8 表示 () 含量的百分数。
- A. 碳化钨 B. 钴 C. 碳化钛
36. 加工铸铁等脆性材料时, 应选用 () 类硬质合金。
- A. 钨钛钴 B. 钨钴 C. 钨钛

三、判断题

1. 锰黄铜具有良好的耐蚀性。 ()
2. 特殊黄铜不含锌。 ()
3. 四六黄铜是普通黄铜中强度最高的一种。 ()
4. H70 表示含铜量为 70% 的普通黄铜。 ()
5. 特殊青铜是在锡青铜的基础上再加入其他元素的青铜。 ()
6. 硬质合金的硬度高, 能耐高温, 有很好的红硬性, 在 1 000 °C 左右的高温下, 仍能保持良好的切削性。 ()
7. 硬质合金的韧性较好, 不怕冲击。 ()
8. 硬质合金能切削高速钢刀具无法切削的难车削材料。 ()
9. 一般情况下, YG3 用于粗加工, YG8 用于精加工。 ()
10. 钨钴类合金按不同含钨量可分为 YG3、YG6、YG8 等多种牌号。 ()
11. 钨钴类合金牌号后的数字越大, 含钴量越高。 ()
12. 钨钴类合金含钴量越高, 其韧性越好, 承受冲击的性能就越好。 ()
13. 钨钴类硬质合金和韧性较好, 因此适用于加工铸铁等脆性材料或冲击较大的场合。 ()
14. 钨钛钴类合金是由碳化钨、碳化钛和钴组成的。 ()
15. YT5 硬质合金车刀适用于粗车塑性金属。 ()
16. 钨钛钴类硬质合金不怕冲击, 适宜加工脆性材料。 ()
17. 钨钛钴类合金按不同含钛量可分为 YT5、YT15、YT30 等多种牌号。 ()
18. 钨钛钴类合金牌号后的数字越大, 含碳化钛量越高。 ()
19. 一般情况下, YT5 用于粗加工, YT30 用于精加工。 ()

20. 钨钛钴类硬质合金硬度很高、耐磨性好、耐高温，因此可用来加工各种材料。()

四、简答题

1. 铝合金性能有哪些特点？铝合金可分为几类？试根据二元铝合金一般相图说明其依据。
2. 硬铝合金的热处理有什么特点？实际操作时要注意哪些问题？
3. 什么是硅铝明？为什么它具有良好的铸造性能？硅铝明采用变质处理的目的是什么？
4. 铜合金性能有哪些特点？铜合金可以分为哪几类？铜合金的强化有哪几种途径？
5. 为什么 H62 黄铜的强度高而塑性较低，而 H68 黄铜的塑性比 H62 黄铜好？
6. 钛合金的应用主要集中在哪些领域？应用前景如何？
7. 滑动轴承合金的工作条件和必备的性能有什么？

项目七



知识检测参考答案

第二部分 能力检测

五、分析题

1. 画出下列材料的组织，标明组织组成物。
ZL102 铸态（未变质处理）、ZL102 铸态（变质处理后）、H62 退火状态、ZSnSb11Cu6 铸态。
2. 指出下列合金的名称、化学成分、主要性质和作用。
LF21、LY11、LC4、LD6、ZL201、ZL401、ZCuSn10P1、ZCuSn5Pb5Sn5。
3. 分析 4%Cu 的 Al-Cu 合金固溶处理与 45 钢淬火两种工艺的不同点及相同点。
4. 画出经固溶处理后的含 4%Cu 的 Al-Cu 合金的自然时效曲线图。
5. 说出下列材料的类别，并举例说明其应用。
LY12, ZL102, H62, ZSnSb11Cu6, QBe2。
例如：LF11，防锈铝合金，可制造油箱。

项目七



能力检测参考答案

第三部分 项目评价

姓名：

学号：

班级：

评价指标		评价内容	评价标准	评价得分（%）		评价人
1	基础知识	铝合金的分类及用途	理解铝合金分类和牌号	完全理解 5% 部分理解 3% 全不理解 0%		
			理解铝合金性能及选用			
		铜合金的分类及用途	理解铜合金分类和牌号			
			理解铜合金性能及选用			
		钛合金的分类及用途	理解钛合金分类和牌号			
			理解钛合金性能及选用			
		轴承合金分类及用途	理解轴承合金分类和牌号			
			理解轴承合金性能及选用			
		硬质合金分类及用途	理解硬质合金分类和牌号			
			理解硬质合金性能及选用			
2	实践能力	非铁合金的选用	合理选用非铁材料、 合理选用轴承合金、 合理选用硬质合金	全部正确 20% 部分正确 10% 全不正确 0%		
		非铁合金等的热处理分析	具有非铁合金热处理的分析能力	全部正确 10% 部分正确 6% 全不正确 0%		
3	职业素养	学习态度 作业质量 团队协作	良好的学习态度和习惯 按时和认真完成作业 积极的团队协作精神	作业准时 5% 作业正确 5% 学习态度 5% 协作精神 5%		