

普通高等教育“十三五”规划教材



机械工程材料

JIXIE GONG CHENG CAI LIAO

主编 弋晓康 李传峰 丁羽

 吉林大学出版社

内容摘要

本书注重能力培养，强调应用，将内容和学习指导有机融合，全书主要包括绪论、金属的晶体结构、纯金属的结晶、金属的塑性变形与再结晶、合金的相结构与二元合金相图、铁碳合金、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、机械工程非金属材料 and 机械零件选材及加工路线分析的内容。本书可作为高等院校本科机械类和近机类专业学生教材，也可作为高等职业技术学院、高等专科学校相关专业的教材和有关专业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料 / 弋晓康, 李传峰, 丁羽主编. -- 长春: 吉林大学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-5677-9351-4

I. ①机… II. ①弋… ②李… ③丁… III. ①机械制
造材料 - 高等学校 - 教材 IV. ①TH14

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第064878号

机械工程材料

主 编 弋晓康 李传峰 丁 羽
副主编 贺小伟 吴明清 王海明
策划编辑: 黄忠杰
责任编辑: 唐万新 装帧设计: 杨 婷
责任校对: 王倩竹

*

吉林大学出版社出版发行

*

社址: 长春市朝阳区明德路501号

邮编: 130021

发行电话: 0431-89580028/29/21

网址: <http://www.jlup.com.cn>

电子邮箱: jdcbs@jlu.edu.cn

绵竹毕升印刷有限公司

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 12 字数: 300千

2017年3月 第1版 2017年3月第1次印刷

印数: 3000

ISBN 978-7-5677-9351-4 定价: 38.00元

版权所有 翻印必究

前言

根据1998年教育部颁布的本科引导性专业目录，“机械工程及自动化”专业涵盖了机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、机械电子工程等专业，是一个机电结合、冷热加工结合的机械类大专业。

《机械工程材料》是机械工程及自动化专业的主干课程之一。针对该专业的特点，本课程在阐述材料科学基本理论及热处理基本原理的同时，着重研究材料的成分、组织结构与性能之间的相互关系及其变化规律，指出材料强韧化的途径，使学生能根据机械零件、工程构件和工模具的使用条件及性能要求，合理选用材料，合理制订热处理技术要求，选定热处理工艺方法，正确安排冷热加工工艺路线，并为从事机械设计与制造、材料加工、机械产品质量控制以及后继课程的学习奠定必要的基础。

本教材的定位是：主要面向机械冷加工，兼顾机械热加工；常用工程材料以金属材料为主，注重工程应用。本教材注意内容的更新，反映材料领域的新发展，在介绍常用金属材料分类与编号时，采用了最新的国家标准，并附上新旧钢号对照表，便于读者对照，同时对近年来广东地区使用较多的外国材料也作了介绍。书中收集了一些常用材料的基本数据，对常用工模具钢的金相标准也作了简要介绍，供专业人员参考。

本书共十二章，由塔里木大学机械电气化工程学院弋晓康、李传峰、丁羽担任主编，塔里木大学机械电气化工程学院贺小伟、吴明清、王海明担任副主编。具体编写分工如下：弋晓康负责编写了第一章的内容；李传峰负责编写了第二章的内容；丁羽负责编写了第三章的内容；第四章的内容由贺小伟和吴明清共同编写；第五章的内容由吴明清和王海明共同编写；第六章的内容由王海明和贺小伟共同编写；第七章的内容由弋晓康和吴明清共同编写；第八章的内容由李传峰和贺小伟共同编写；第九章的内容由丁羽和王海明共同编写；第十章的内容由王海明和弋晓康共同编写；第十一章的内容由贺小伟和李传峰共同编写；第十二章的内容由吴明清和丁羽共同编写。本书由弋晓康、李传峰和丁羽负责了最后的统稿、审校、排版等工作。

由于编者水平有限，疏漏之处难免存在，敬请读者批评指正。

编者

2016年12月

目录

第一章 绪论

- 1/ 第一节 材料的定义、地位和作用
- 2/ 第二节 工程材料的分类
- 5/ 第三节 材料发展简史及材料科学的形成

第二章 金属的晶体结构

- 9/ 第一节 金属的晶体结构
- 10/ 第二节 实际金属的晶体结构

第三章 纯金属的结晶

- 15/ 第一节 纯金属的结晶
- 16/ 第二节 铸锭的组织与缺陷

第四章 金属的塑性变形与再结晶

- 21/ 第一节 金属的变形特性和常用力学性能指标
- 29/ 第二节 金属的塑性变形
- 34/ 第三节 塑性变形对组织和性能的影响
- 37/ 第四节 回复与再结晶

第五章 合金的相结构与二元合金相图

- 41/ 第一节 合金的相结构
- 43/ 第二节 二元合金相图的建立
- 43/ 第三节 匀晶、共晶、包晶相图
- 56/ 第四节 形成稳定化合物的相图

第六章 铁碳合金

- 59/ 第一节 铁碳合金的组元及基本相
- 60/ 第二节 铁碳合金的平衡结晶过程及组织
- 67/ 第三节 含碳量对铁碳合金平衡组织和性能的影响
- 71/ 第四节 碳钢

第七章 钢的热处理

- 81/ 第一节 钢在加热时的组织转变
- 82/ 第二节 钢在冷却时的组织转变
- 85/ 第三节 钢的退火与正火
- 87/ 第四节 钢的淬火与回火

第八章 合金钢

- 93/ 第一节 合金元素在钢中的作用
- 96/ 第二节 合金结构钢
- 99/ 第三节 轴承钢
- 102/ 第四节 合金工具钢
- 103/ 第五节 不锈钢和耐热钢

第九章 铸铁

- 117/第一节 普通灰铸铁
- 118/第二节 可锻铸铁
- 119/第三节 球墨铸铁
- 120/第四节 特殊性能铸铁

第十章 有色金属及其合金

- 123/第一节 铝及其合金
- 126/第二节 铜及其合金
- 129/第三节 镁及其合金
- 131/第四节 轴承合金

第十一章 机械工程非金属材料

- 135/第一节 高分子材料
- 137/第二节 陶瓷材料
- 138/第三节 复合材料
- 141/第四节 橡胶与塑料

第十二章 机械零件选材及加工路线分析

- 147/第一节 机械零件的失效形式
- 148/第二节 选材的基本原则
- 151/第三节 热处理方案的选择及热理技术条件的标注
- 153/第四节 预防和控制热处理变形的方法及措施
- 157/第五节 典型零件选材与工艺分析

工程材料是构成机械设备的基础，也是各种机械加工的对象，包括金属材料、非金属材料 and 复合材料等。材料成形工艺包括各种材料的铸造、锻压、焊接、聚合、烧结和钳工、机械加工等加工技术。材料应用和成形工艺技术是机械制造过程的重要组成部分，机械制造生产过程就是将各种原材料经过成形、改性、连接等工艺转变为机器的过程。

第一节 材料的定义、地位和作用

材料是人类文明生活的物质基础。综观人类利用材料的历史，可以清楚地看到每一类重要新材料的发现和应用，都会引起生产技术的革命，并大大加速社会文明发展的进程。人类社会所谓石器时代、青铜器时代和铁器时代就是按生产活动中起主要作用的材料划分的。材料与你和你的工作密不可分。

工程材料通常可按成分特点分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料三大类。复合材料则是由两种或两种以上的基本材料组成、按性能特点，工程材料可分为结构材料和功能材料两大类。结构材料阻力学性能为主，兼有一定的物理、化学性能；功能材料以特殊的物理、化学性能为主，如超导、激光、半导体、形状记忆和能量转换等材料工程材料的研究对象主要是结构材料，在各种机械设备中，目前应用最广、最多的仍然是金属材料，占整个材料的80%~90%，这是由于金属材料具有比其他材料远为优越的使用性能和工艺性能。无机非金属材料 and 有机高分子材料用于机械工程也越来越多，并逐步显示出广阔的发展前景。本书主要研究金属材料，并对无机非金属材料 and 有机高分子材料作简要介绍。

第二节 工程材料的分类

在生活、生产和科技各个领域，用于制造结构、机器、工具和功能器件的各类材料称为工程材料。工程材料按其组成特点可分为金属材料、有机高分子材料、无机非金属材料及复合材料四大类。若按材料的使用性能可分为结构材料与功能材料两大类。结构材料是作为承力结构使用的材料，其使用性能主要是力学性能；功能材料的使用性能主要是光、电、磁、热、声等特殊功能性能。按应用领域材料又可分为信息材料、能源材料、建筑材料、机械工程材料、生物材料、航空航天材料等多种类别。

金属材料的分类如表1.21所示。由于金属材料工业已形成了庞大的生产能力，并且质量稳定，性能价格比具有一定的优势，所以金属材料仍占据材料工业的主导地位。目前，金属材料不断推陈出新，许多新兴金属材料应运而生。例如，传统的钢铁材料正在不断提高质量、降低成本、扩大品种规格，在冶炼、浇铸、加工和热处理等工艺上不断革新；在非铁金属及合金方面出现了高纯高韧铝合金，先进的镍基高温合金等。此外，还涌现了其它许多新型高性能金属材料，如快速凝固金属非晶和微晶材料、纳米金属材料、超导材料和单晶合金等。新型金属功能材料，如形状记忆合金、超细金属隐身材料及活性生物医用材料等也正在向着高功能化和多功能化发展。

开始大量使用铁器，白口铸铁、可锻铸铁相继出现。1953年从河北兴隆地区发掘出来的战国铁器遗址中，就有浇铸农具用的铁模子，说明当时已掌握铁模铸造技术。随后出现了炼钢、锻造、钎焊和退火、淬火、正火、渗碳等热处理技术。用现代技术对古代宝剑进行检验，揭开了宝剑在阴暗潮湿的地下埋藏2000多年仍保持通体光亮锋利异常的奥妙，越王剑经过了硫化处理，秦皇陶俑剑采用了钝化处理技术，这些表面处理技术在现代仍是重要的防护方法。我国的金属切削加工工艺发展可追溯到青铜器时代，越王剑的刃口磨得非常精细，可与目前精密磨床得到的产品相媲美。在湖南衡阳出土的相当精致的东汉人字齿轮，说明在汉朝就有了金属机件。明朝出现了简单的切削加工设备。清初6.6m的嵌齿铣刀，用牲畜带动旋转，用来铣削天文仪上的铜环。明朝宋应星所著《天工开物》锻造、淬火等各种金属加工的方法，其中记述关于铣刀的制造、翻修和热处理工艺与今日相差无几。上述事实，生动地说明了中华民族在材料及其加工方面对世界文明和人类进步作出的卓越贡献。21世纪初叶，我国的现代工程材料与成形技术又有了可喜的发展，2003年我国钢铁材料年产量超过2亿吨，已成为世界上最大的钢铁生产和消费国家。

18世纪20年代初先后在欧美发生的产业革命极大地促进了钢铁工业、煤化学工业和石油化学工业的快速发展。各类新材料不断涌现，材料对科学技术的发展发挥着关键性作用。以航空工业为例，1903年世界上第一架飞机所用的主要结构材料是木材和帆布，飞行速度每小时仅16km。1911年硬铝合金研制成功，金属结构取代木布结构，使飞机性能和速度获得一个飞跃；喷气式飞机超过音速，高温合金材料对制造涡轮发动机起到重要作用；当飞机速度在2~3倍音速时，飞机表面温度会升到300℃，飞机材料只能采用不锈钢或钛合金；至于航天飞机机体表面温度会高达1000℃以上，只能采用高温合金材料及防氧化涂层。目前，玻璃纤维增强塑料、碳纤维高温陶瓷复合材料、陶瓷纤维增强塑料等复合材料在飞机、航天飞行器上已获得广泛应用。

第一节 钢在加热时的组织转变

加热是热处理的第一道工序。大多数热处理工艺首先要将钢加热到相变点上，目的是获得奥氏体。共析钢、亚共析钢和过共析钢分别被加热到PSK A_1 、GS A_3 和ES A_{cm} 、 A_1 、 A_3 和 A_{cm} 都是平衡相变点。但在实际热处理时，加热和冷却都不可能是非常缓慢的，因此组织转变都要偏离平衡相变点，即加热时偏向高温，冷却时偏向低温。为了区别于平衡相变点，通常将加热时的相变点用 Ac_1 、 Ac_3 和 Ac_{cm} 表示3C相图上的位置示意。钢的相变点是制定热处理工艺参数的重要依据，各种钢的相变点可在热处理手册中查到。

任何成分的钢加热到A线以上时，都要发生珠光体向奥氏体的转变过程体化过程包括大、如图7.2所示

奥氏体晶粒的大小对冷却转变后钢的性能有很大影响。热处理加热时，若获得细小、均匀的奥氏体，则冷却后钢的力学性能就好。因此，奥氏体晶粒的大小是评定热处理加热质量的主要指标之一。

在高温下，奥氏体晶粒长大是一个自发过程。奥氏体化温度越高，保温时间越长，奥氏体晶粒长大越明显。随着钢中奥氏体含碳量的增加，奥氏体晶粒长大的倾向也增大。

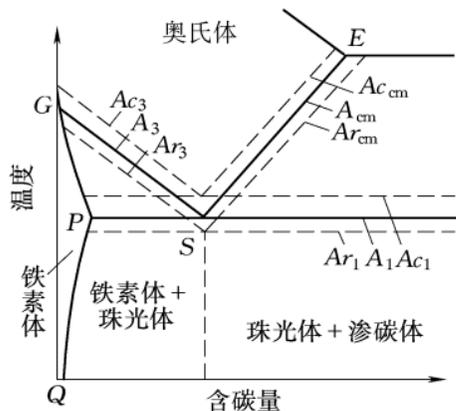


图7.1 加热和冷却时Fe-Fe₃C相图上各相变点的位置

但当1.2%时，奥氏体晶界上存在未溶的渗碳体能阻碍晶粒的长大。钢中加入能生成稳定碳化物的元素化物的元素化物的元素为了控制奥氏体晶粒长大应采取以下措施：热处理加热时要合理选择并严格控制加热温度和保温时间，合理选择钢的原始组织及选用含有一定量合金元素的钢材等。

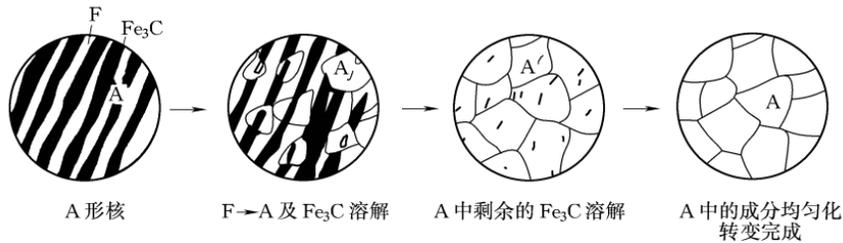


图7.2 共析钢中奥氏体形成过程示意图

第二节 钢在冷却时的组织转变

钢经加热奥氏体化后，可以通过采用不同的冷却条件，获得需要的组织和性能。由表7-1可以看出，45钢由于冷却速度不同，其力学性能有明显差别。

表7-1 45钢经840℃加热后，不同条件冷却后的力学性能

冷却方法	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	HRC
随炉冷却	519	272	32.5	49	15~18
空气冷却	657~706	333	15~18	45~50	18~24
油中冷却	882	608	18~20	48	40~50
水中冷却	1078	706	7~8	12~14	52~60

在热处理生产中，常用的冷却方式有两种，即等温冷却和连续冷却，如图7.3所示。钢在连续冷却或等温冷却条件下，由于冷却速度较快，其组织的转变均不能用 $Fe-Fe_3C$ 平衡相图分析，而是测定了过冷奥氏体等温转变图来分析过冷奥氏体在不同冷却条件下组织转变的规律。所谓“过冷奥氏体”是指在相变温度 A_1 以下，未发生转变而处于不稳定状态的奥氏体。过冷奥氏体总是要自发地转变为稳定的新相，在 A_1 温度以下不同温度范围内，可发生三种不同类型的转变：高温的珠光体型转变；中温的贝氏体型转变和低温的马氏体型转变。

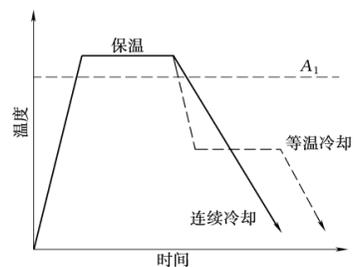


图7.3 两种冷却方式示意图

转变并使其组织结构稳定化，以保证工件在以后的使用过程中不再发生尺寸和形状的改变。

因此，回火的目的如下：

- (1)降低脆性，消除内应力，防止工件在使用过程中产生变形和开裂。
- (2)提高钢的韧性，适当调整钢的强度和硬度，以满足各种工件的使用要求。
- (3)减少或消除残余奥氏体，以稳定工件尺寸，保证工件的精度等级。

3.回火的工艺种类

根据钢在回火后组织和性能的不同，按回火温度范围可将回火分为三种：低温回火、中温回火和高温回火。

1)低温回火

低温回火的回火温度是 $150^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 。回火后得到回火马氏体组织，硬度一般为 $58\text{HRC} \sim 64\text{HRC}$ 。低温回火的目的是保持高的硬度和耐磨性，降低内应力，减少脆性。它主要适用于刀具、量具、模具和轴承等要求高硬度、高耐磨性的工具和零件。

2)中温回火

中温回火的回火温度是 $350^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ 。回火后得到回火屈氏体组织，硬度为 $35\text{HRC} \sim 45\text{HRC}$ 。中温回火的目的是获得较高的弹性和屈服极限，同时又有一定的韧性。它主要用于弹簧、发条、热锻模等零件的处理。

3)高温回火

高温回火的回火温度是 $500^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ 。回火后得到回火索氏体组织，硬度为 $25\text{HRC} \sim 35\text{HRC}$ 。高温回火的目的是获得强度、塑性、韧性都较好的综合机械性能。

4.回火脆性

一般来说，回火后钢的性能只与加热温度的高低有关，而与冷却速度无关但在以下温度区间的回火处理可能会造成零件脆性的增加。淬火钢在 $500^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ 范围内回火后缓冷时出现的脆性称为高温回火脆性，也称为第二类回火脆性。这种脆性主要发生在含Cr、Ni、Si、Mn等合金元素的结构钢中。碰到这种情况，可以采用回火后快速冷却的方法加以避免。淬火钢在 $250^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ 范围内回火时出现的脆性叫做低温回火脆性，也叫第一类回火脆性。几乎所有的钢都存在这类脆性，这是一种不可逆回火脆性，目前尚无有效办法完全消除这类回火脆性，所以一般都不在 $250^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ 这个温度范围内回火。

工业上使用的金属材料，习惯上可分为黑色金属和有色金属两大类。钢及铸铁为黑色金属，其它非铁金属及合金，如铝、铜、镁、钛、锡、铅、锌等金属及其合金为有色金属。有色金属具有许多特殊性能，在机电、仪表，特别是在航空、航天及航海等工业中具有重要的作用。

第一节 铝及其合金

1. 纯铝

纯铝为面心立方晶体结构，塑性好，强度、硬度低，一般不宜作结构材料使用。但由于其密度低，基本无磁性，导电导热性优良，抗大气腐蚀能力强，可主要用于制作电线、电缆、电气元件及换热器件。纯铝的导电导热性随其纯度降低而变差，所以纯度是纯铝材料的重要指标。其牌号中数字表示纯度高低。例如工业纯铝，旧牌号有L1、L2、L3…。符号L表示铝，后面的数字越大纯度越低。对应新牌号为1070、1060、1050…。

2. 铝合金的分类

铝中加入Si、Cu、Mg、Zn、Mn等元素制成合金，强度提高，还可以通过变形、热处理等方法进一步强化。所以铝合金可以制造某些结构零件。依据其成分和工艺性能，铝合金可划分为变形铝合金和铸造铝合金两大类，前者塑性优良，适于压力加工；后者塑性低，更适宜于铸造成型。铝合金一般都具有图10.1所示类型的相图。凡位于D左边的铝合金，在加热时都能形成单项固溶体组织，这类合金塑性较高，属变形铝合金。位于D右边的铝合金都具有低熔点共晶组织，流

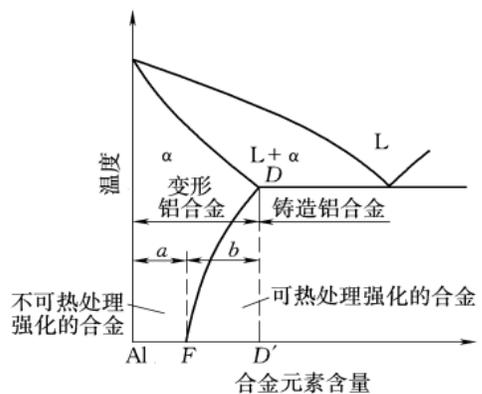


图10.1 铝合金相图的一般类型

动性好，属铸造铝合金。变形铝合金还可进一步划分成可热处理强化变形铝合金，b段成分合金，a段成分合金。

铸造铝合金牌号由Z和基体金属元素的化学符号、主要合金元素化学符号以及表明合金化元素百分含量的数字组成，优质合金在牌号后面标注A。在合金牌号前面冠以字母ZY表示为压铸合金。

变形铝及铝合金采用国际四位数字牌号命名方法。牌号第一位数字表示铝及铝合金的组别1×××，2×××，3×××，……,9×××，分别按顺序代表纯铝、以铜为主要合金元素的铝合金、以锰、以硅、以镁、以镁和硅、以锌、以其他合金元素为主要合金元素的铝合金及备用合金组；牌号第二位数字或字母表示改型情况，最后两位数字用以标识同一组中不同的铝合金。

3. 铝合金的强化途径

不可热处理的变形铝合金在固态范围内加热、冷却无相变，因而不能热处理强化，其常用的强化方法是冷变形，如冷轧、压延等工艺。

可热处理强化变形铝合金不但可变形强化，还能够通过热处理进一步强化，其工艺是先固溶处理不同的，其强度、硬度并无显著提高，若将其在常温下放置一段时间硬度上升，塑性、韧性下降的效果才逐步产生，这种合金的性能随时间而变化的现象称为时效。合金工件经固溶处理后，在室温进行的时效处理称为自然时效处理。若要缩短时效时间，可以在加热条件进行人工时效处理。

铸造铝合金组织中有一定比例的共晶体，熔点低，故流动性好，可制造形状复杂的零件，但共晶体往往比较粗大且韧性差，这是铸造铝合金强度低，塑性、韧性差的主要原因。若采用变质处理就能使共晶体细化，并在一定程度上使铸造铝合金强化、韧化。

4. 变形铝合金

变形铝合金可分为防锈铝合金类。常用变形铝合金的牌号、力学性能及用途列于表10-1中。

表10-1 常用变形铝合金的牌号、性能和用途

类别	原代号	新牌号	半成品种类	状态 ^①	力学性能		用途举例	
					σ /MPa	δ/%		
防锈铝合金	LF2	5A02	冷轧板材	0	167~226	16~18	在液体下工作的中等强度的焊接件、冷冲压件和容器、骨架零件等	
			热轧板材	H112	117~157	7~6		
			挤压板材	0	≤226	10		
	LF21	3A21	冷轧板材	0	98~147	18~20		要求高的可塑性和良好的焊接件、在液体或气体介质中工作的低载荷零件，如油箱、油管、液体容器、饮料罐
			热轧板材	H112	108~118	15~12		
			挤制厚壁管材	H112	≤167	—		

上，形成薄而均匀的一层内衬，这步工艺称为“挂衬”。

3. 铅基轴承合金

铅基轴承合金的硬度、强度和韧性比锡基轴承合金低，但由于价格便宜，铸造性能好，常做低速、低负荷的轴承使用，如汽车、拖拉机的曲轴轴承及电动机轴承等。

4. 铜基轴承合金

铜基轴承合金有铅青铜(如ZCuPb30)、锡青铜(如ZCuSn10Pb1)。

铅青铜ZCuPb30具有高的疲劳强度和承载能力，优良的耐磨性、导热性和低的摩擦系数，能在较高温度(250℃)下正常工作，因此可以制造承受高载荷、高速度的重要轴承，如航空发动机、高速柴油机等的轴承。铅青铜的强度较低，因比也需在钢瓦上挂衬，制成双金属轴承。

锡青铜ZCuSn10Pb1能承受较大的载荷，广泛用于中等速度及受较大的固定载荷的轴承，如电动机、泵、金属切削机床的轴承。

5. 铝基轴承合金

铝基轴承合金是一种新型减摩材料，具有密度小、导热性好、疲劳强度高和耐蚀性好等优点，并且原料丰富，价格低廉。但其膨胀系数大，运转时容易与轴咬合。常用的铝基轴承合金有如下两类。

(1) 铝锑镁轴承合金

该合金与08钢板一起热轧成双金属轴承，生产工艺简单，成本低廉，并具有良好的疲劳强度和耐磨性，但承载能力不大。

(2) 铝锡轴承合金

这种合金也以08钢为衬背轧制成双合金带。它具有较高的疲劳强度和较好的耐热性、耐磨性及耐蚀性，生产工艺简单，成本低。目前用它代替其他轴承合金，广泛应用于汽车、拖拉机和内燃机车等。