



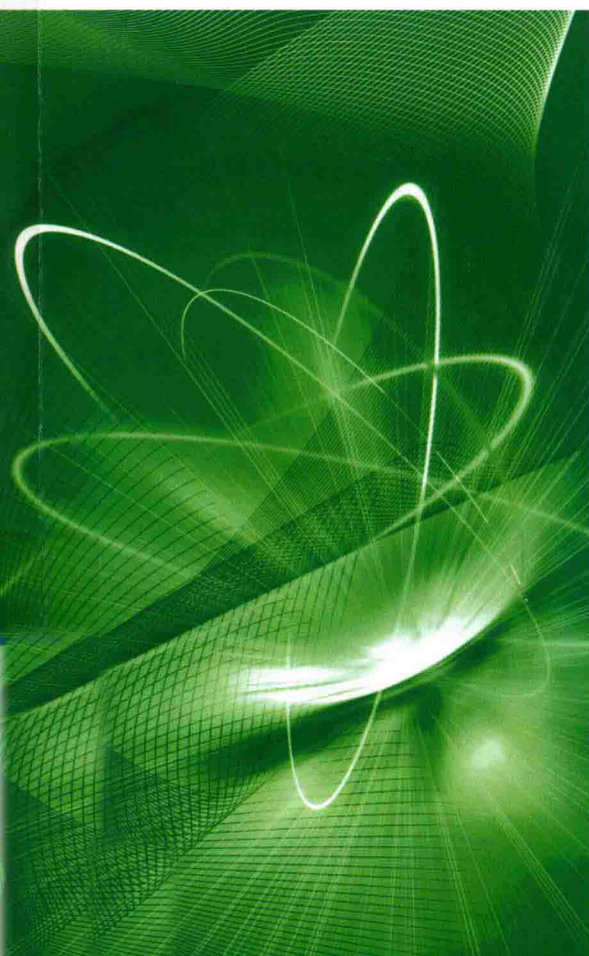
“十三五”江苏省高等学校重点教材

缪 强 梁文萍 主编

Materials Science

高等学校教材 · 材料科学与工程

有色金属材料科学



西北工业大学出版社



“十三五”江苏省高等学校重点教材(2017-2-031)

高等学校教材·材料科学与工程

有色金属材料科学

缪 强 梁文萍 主编



西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本书立足学科发展前沿、强化基础理论学习,拓宽学生的知识面,培养学生分析和解决复杂问题的综合能力,反映有色金属材料的新知识、新技术、新工艺和新方法。本书内容丰富完整,包括有色金属的基础知识、铝及其合金、铜及其合金、钛及其合金、轴承合金、镍基合金、镁及其合金、锌及锌合金、贵金属及其合金、难熔金属及其合金、先进金属结构材料等。

本书不仅可以满足高等学校材料类、机械类、航空航天类、能源动力类等专业的人才培养需求、为相关专业课程提供配套教材,而且也可从事相关工程技术领域研究及生产的科研人员与工程技术人员提供很好的参考。

图书在版编目(CIP)数据

有色金属材料学/缪强,梁文萍主编. —西安:西北工业大学出版社,2016.8(2018.9重印)
ISBN 978-7-5612-5069-3

I. ①有… II. ①缪… ②梁… III. ①有色金属—金属材料—材料科学—高等学校—教材 IV. ①TG146

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 216254 号

YOUSE JINSHU CAILIAOXUE

有色金属材料学

策划编辑:雷 军

责任编辑:马文静

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号

邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印刷者:陕西向阳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm

1/16

印 张:18.875

字 数:457 千字

版 次:2016 年 8 月第 1 版

2018 年 9 月第 2 次印刷

定 价:48.00 元

前 言

本书立足于反映学科发展前沿、强化基础理论学习,拓宽学生的知识面,培养学生分析和解决复杂问题的综合能力,反映有色金属材料的新知识、新技术、新工艺、新方法。本书已入选2017年“十三五”江苏省高等学校重点教材(新编)项目。

本书共11章,包括有色金属的基础知识、铝及其合金、铜及其合金、钛及其合金、轴承合金、镍基合金、镁及其合金、锌及锌合金、贵金属及其合金、难熔金属及其合金、先进金属结构材料等。本书主要特色是:落实立德树人根本任务,贯彻社会主义核心价值观,内容紧扣有色金属材料在航空航天领域中的应用,凸显国防特色;体系完整,知识体系涵盖矿、冶、加工等制备全流程;内容新颖,反映本学科国内外有色金属材料科学研究和教学研究的先进成果;特色鲜明,对航空航天领域中的大量案例进行分析;实用性强,突出有色金属材料的理论与实践的结合;依据最新的国家标准。

本书由缪强教授、梁文萍教授担任主编,其中缪强教授负责编写第1章、第3章、第5章和第7~11章,梁文萍教授负责编写第2章、第4章和第6章,全书由缪强教授统稿。本书由北京科技大学孙建林教授、北京航空材料研究院张旺峰教授、西北工业大学王永欣教授、西北有色金属研究院李争显教授、上海交通大学朱申敏教授等五位专家组成的专家组负责审定,专家们付出了大量的心血,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!在本书编写过程中,博士生崔世宇和夏金娇,硕士生李柏强、陈博文、胡荣耀、黄彪子、耿建飞、张毅、王旭、李珊、宋友朋和韩小娇等收集整理了大量资料。同时,在本书编写过程中,笔者参考了一些文献资料,在此对其作者一并表示感谢。

由于水平有限,书中难免有疏漏和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

2018年8月

目 录

第 1 章 有色金属的基础知识	1
1.1 金属的分类	1
1.2 金属的冶炼	3
1.3 金属的物理性能	5
1.4 金属的化学性能	13
1.5 金属的力学性能	15
1.6 金属的加工方法	20
1.7 有色金属的热处理及其强化理论基础	26
参考文献	34
第 2 章 铝及其合金	35
2.1 铝的基本特性	35
2.2 铝的冶炼	37
2.3 铝及铝合金的加工	41
2.4 铝合金的分类及合金化原理	44
2.5 铝合金的热处理及时效强化理论	46
2.6 变形铝合金	52
2.7 铸造铝合金	56
2.8 铝锂合金	61
2.9 先进铝基结构材料	64
参考文献	70
第 3 章 铜及其合金	72
3.1 铜的基本特性	72
3.2 铜的资源 and 冶炼	74
3.3 铜及铜合金的加工	77
3.4 铜合金的分类及其合金化原理	78
3.5 黄铜	81
3.6 青铜	88
3.7 白铜	103
3.8 铜及铜合金的热处理	105
参考文献	110

第 4 章 钛及其合金	111
4.1 钛及钛合金的基本特征	111
4.2 钛的资源 and 冶炼	116
4.3 钛及钛合金加工	122
4.4 钛合金的分类及其合金化原理	128
4.5 工业钛合金	132
4.6 钛合金的相变及其热处理	136
4.7 钛合金的发展	146
参考文献.....	155
第 5 章 轴承合金	157
5.1 轴承合金的基本性能要求和组织特征	157
5.2 锡基轴承合金	160
5.3 铅基轴承合金	163
5.4 铝基轴承合金	165
5.5 其他轴承合金	169
参考文献.....	171
第 6 章 镍基合金	172
6.1 高温合金概述	172
6.2 镍的基本特性和镍基合金的分类	177
6.3 镍基高温合金的成分和组织特征	181
参考文献.....	190
第 7 章 镁及其合金	192
7.1 镁及镁合金的基本特性	192
7.2 镁的资源 and 冶炼	194
7.3 镁的合金化及热处理原理	197
7.4 工业镁合金	208
7.5 镁合金的腐蚀与防护	212
参考文献.....	217
第 8 章 锌及锌合金	218
8.1 锌的基本特征与用途	218
8.2 常用锌合金	222
参考文献.....	229

第 9 章 贵金属及其合金	230
9.1 贵金属的性质	230
9.2 银及其合金	232
9.3 金及其合金	235
9.4 铂族金属及其合金	240
参考文献	245
第 10 章 难熔金属及其合金	246
10.1 难熔金属概述	246
10.2 钨基合金	250
10.3 钼及其合金	256
10.4 钽及其合金	260
10.5 铌及其合金	264
参考文献	270
第 11 章 先进金属结构材料	272
11.1 金属基复合材料	272
11.2 超急凝固金属材料	278
11.3 超塑性合金	285
参考文献	293

第1章 有色金属的基础知识

1.1 金属的分类

金属是一种具有光泽(即对可见光强烈反射),富有延展性,容易导电、导热的物质。金属的上述性质与金属晶体内含有自由电子有关。不仅纯金属,例如铝、铜、铁等具有上述性质,当纯金属中加入某些金属元素或含有一定量的非金属元素的复杂物质时,即所谓金属合金也具有上述性质,因而广义地说,金属合金亦称为金属。

根据冶金工业分类,通常将金属分为两类:黑色金属和有色金属。

1.1.1 黑色金属

黑色金属通常指铁、锰、铬及它们的合金。锰和铬主要用于制造合金钢,而钢铁表面通常覆盖着一层黑色的四氧化三铁,故把铁、锰、铬及它们的合金叫作黑色金属。黑色金属具有暗灰色、高密度(碱土金属除外)、高熔点、硬度较高等特质,并在许多情况下具有多晶型性。这类金属中最典型的是铁。

1.1.2 有色金属

狭义的金屬有色金屬又称非铁金属,通常是指除黑色金属以外的所有金属。有色金属多半具有特征颜色,例如红、黄或白色,并且具有高塑性、低硬度、较低的熔点和无多晶型性等特征。这类金属中最典型的是铜。

广义的金屬有色金屬还包括有色金属合金。有色金属合金是由一种有色金属作为基体(通常大于50%),加入另一种(或几种)金属或非金属组分所组成的既具有基体金属通性又具有某些特定性能的物质。

一、有色纯金属

有色纯金属分为重金属、轻金属、贵金属、半金属和稀有金属等5类。

1. 重金属

重金属指密度大于 4.5 g/cm^3 的金属,包括铜、镍、铅、锌、钴、锡、铋、汞、镉、铟。重金属的冶炼一般分为火法冶炼和湿法冶炼两种。

2. 轻金属

轻金属指密度小于 4.5 g/cm^3 的金属,包括铝、镁、钾、钠、钙、锶、钡。这类金属的共同特点是密度小($0.53\sim 4.5\text{ g/cm}^3$),化学性质活泼,与氧、硫、碳和卤素的化合物都相当稳定。因此这类金属多采用熔盐电解法和金属热还原法提取。轻金属铝在自然界中占地壳重量的8%(铁为5%),目前铝已成为有色金属中生产量最大的金属。

4. 半金属

5. 稀有金属

稀有金属跟普通金属没有严格的界限,例如有的稀有金属在地壳中的含量比铜、汞、镉等金属还要多。以下金属一般被认为是稀有金属:锂(Li)、铷(Rb)、铯(Cs)、铍(Be)、钨(W)、钼(Mo)、钽(Ta)、铌(Nb)、钛(Ti)、锆(Zr)、铪(Hf)、钒(V)、铼(Re)、镓(Ga)、铟(In)、铊(Tl)、锗(Ge)、钪(Sc)、钇(Y)、镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu)、钋(Po)、镭(Ra)、锕(Ac)、钍(Th)、镤(Pa)、铀(U)以及人造超铀元素等。

(1)稀有轻金属。

稀有轻金属包括 5 个金属：锂、铍、铷、铯、铊。其共同特点是密度小、化学活性很强。

(2) 稀有高熔点金属。

稀有高熔点金属包括 8 个金属:钨、钼、钽、铌、锆、铪、钽、铌。其共同特点是熔点高(1 830 ℃(钽)~3 400 ℃(钨)),硬度大,抗腐蚀性强,可与一些非金属生成非常硬且非常难熔的稳定化合物。

(3) 稀有分散金属。

稀有分散金属也称稀散金属,包括四个金属:镓、铟、铊、锗。除铊以外都是半导体材料。大多数稀散金属在自然界中没有单独矿物存在。

(4) 稀土金属。

稀土金属包括镧系元素以及和镧系元素性质相近的钪和钇,共 17 个:钪、钇、镧、铈、镨、钕、钷、铈、钐、铕、钆、铽、镱、铟、铊、镱和镱。其中,从镧到铕称为轻稀土,从钆到镱包括钪和钇称为重稀土。

(5)稀有放射性金属。

稀有放射性金属包括各种天然放射性元素:钋(Po)、镭(Ra)、锕(Ac)、钍(Th)、镤(Pa)、铀

(U)以及各种人造超铀元素钚(Fr)、锝(Tc)、镎(Np)、钷(Pu)、镅(Am)、锔(Cm)、锫(Bk)、锇(Cf)、锿(Es)、镆(Fr)、钔(Md)、锘(No)和铹(Lw)。天然放射性元素在矿石中通常是共同存在的,它们常与稀土金属矿伴生。

二、有色金属合金

有色金属合金的分类方法很多。按合金系统分为重有色金属合金、轻有色金属合金、贵金属合金、稀有金属合金；按基体金属分为铜合金、铝合金、钛合金、镍合金、锌合金等；按其生产方法分为铸造合金、变形合金；按合金用途分为变形合金(压力加工用合金)、铸造合金、轴承合金、印刷合金、硬质合金、焊料、中间合金、金属粉末等；根据组成合金的元素数目，分为二元合金、三元合金、四元合金和多元合金。一般合金组分的总含量(质量分数)小于2.5%者，为低合金；总含量为2.5%~10%者，为中合金；总含量大于10%者，为高合金。有色金属合金的强度和硬度一般比纯金属高，电阻比纯金属大、电阻温度系数小，具有良好的综合机械性能。

有色金属合金是国民经济发展的基础材料,航空、航天、汽车、机械制造、电力、通信、建筑、家电等绝大部分行业都以有色金属材料为生产基础。它不仅是重要的战略物资、生产资料,还是人类生活中不可缺少的消费资料。

1.2 金属的冶炼

在自然界中,除金、银等少数几种不活泼金属以游离态存在外,绝大多数金属都以正价态化合物存在。冶炼金属是从矿石中提取金属单质的过程,除物理方法外,金属冶炼是指把金属从化合态转变为游离态的化学过程。

由于原料条件的不同和金属性质的差异,冶金方法是多种多样的,根据冶炼过程和方法的不同,大致可分为以下 3 种类型。

1.2.1 火法冶金

火法冶金又称干式冶金,是在高温条件下对矿石或精矿进行熔化作业并通过还原、氧化焙烧等反应制取金属和合金的过程。其流程一般包括原料准备(烧结、球团、焙烧等)、熔炼过程和精炼过程等主要工序。火法冶金是冶炼金属的主要方法,目前工业上大规模的钢铁冶炼、主要的有色金属冶炼和某些稀有金属的提取都采用该方法。

火法冶金工艺流程一般分为矿石准备、冶炼和精炼 3 个步骤。

(1) 矿石准备。选矿得到的细粒精矿不易直接加入鼓风炉(或炼铁高炉),须先加入冶金熔剂(能与矿石中所含的脉石氧化物、有害杂质氧化物作用的物质),加热至低于炉料的熔点烧结成块;或添加黏合剂压制成型;或滚成小球再烧结成球团;或加水混捏;然后装入鼓风炉内冶炼。硫化物精矿在空气中焙烧的主要目的是:除去硫和易挥发的杂质,并使之转变成金属氧化物,以便进行还原冶炼;使硫化物成为硫酸盐,随后用湿法浸取;局部除硫,使其在造锕熔炼中成为由几种硫化物组成的熔锕。

(2) 冶炼。此过程形成由脉石、熔剂及燃料灰分融合而成的炉渣和熔铕(有色重金属硫化物与铁的硫化物的共熔体)或含有少量杂质的金属液。冶炼方式包括还原冶炼、氧化吹炼和造铕熔炼 3 种。①还原冶炼在还原气氛下的鼓风炉内进行,加入的炉料除富矿、烧结块或球团

外,还加入熔剂(石灰石、石英石等)以便造渣,加入焦炭作为发热剂(产生高温)和还原剂。还原铁矿为生铁,还原氧化铜矿为粗铜,还原硫化铅精矿的烧结块为粗铅。②氧化吹炼在氧化气氛下进行,例如对生铁采用转炉,吹入氧气,以氧化除去铁水中的硅、锰、碳和磷等杂质,炼成合格的钢水,铸成钢锭。③造钎熔炼主要用于处理硫化铜矿或硫化镍矿,一般在反射炉、矿热电炉或鼓风机内进行,加入酸性石英石熔剂与氧化生成的氧化亚铁及脉石造渣,熔渣之下形成一层熔钎,在造钎熔炼中,部分铁和硫被氧化,更重要的是通过熔炼使杂质造渣,提高熔钎中主要金属的含量,起到化学富集的作用。

(3)精炼。进一步处理由冶炼得到的含有少量杂质的金属,以提高其纯度。例如炼钢是对生铁的精炼,在炼钢过程中去气、脱氧,并除去非金属夹杂物,或进一步脱硫等;对粗铜则在精炼反射炉内进行氧化精炼,然后铸成阳极进行电解精炼;对粗铅采用氧化精炼方法除去其所含的砷、锑、锡、铁等,并可用特殊方法,例如派克司法回收粗铅中所含的金、银。对高纯金属则可用区域熔炼等方法进行进一步提炼。

1.2.2 湿法冶金

湿法冶金是采用液态溶剂(通常为无机水溶液或有机溶剂)进行矿石浸出、分离和提取金属及其化合物的方法。湿法冶金包括4个主要步骤:①使用溶剂将原料中的有用成分转入溶液,即浸取;②浸取溶液与残渣分离,同时将夹带于残渣中的冶金溶剂和金属离子回收;③浸取溶液的净化和富集,通常采用离子交换和溶剂萃取技术或其他化学沉淀方法;④从净化液中提取金属或金属化合物。

湿法冶金在锌、铝、铜、铀等工业中具有重要地位,世界上全部的氧化铝、氧化铀,大部分锌和部分铜都是用湿法冶金生产的,这种方法已大部分代替了过去的火法炼锌。其他难于分离的金属,例如镍-钴-钼-钨-钽-铌及稀土金属也都采用湿法冶金技术(溶剂萃取或离子交换等新方法)进行分离,取得了显著的效果。湿法冶金的优点在于对非常低品位矿石(如金、铀)的适用性,对相似金属(如钨、钼)难分离情况的适用性,以及和火法冶金相比,材料的周转较简单,原料中有价金属综合回收程度高,有利于环境保护,并且生产过程较易实现连续化和自动化。湿法冶金设备和操作相对比较简单,应用范围日益扩大,目前主要用于有色金属、稀有金属及贵金属的提取。

1.2.3 电冶金

电冶金是利用电能冶炼金属的一种方法,可分为电热冶金和电化学冶金。电化学冶金又根据电解质的不同分为水溶液电化学冶金和熔盐电化学冶金。

一、电热冶金

电热冶金是利用电能获得冶金所要求的高温而进行的冶金生产。与火法冶金不同,电热冶金的热能由电能转化而成,火法冶金则是以燃料燃烧产生高温热源。例如电弧炉炼钢是通过石墨电极向电弧炼钢炉内输入电能,以电极端部和炉料之间发生的电弧为热源进行炼钢,可获得比用燃料供热更高的温度,且炉内气氛较易控制,对熔炼含有易氧化元素较多的钢种极为有利。

二、电化学冶金

根据电解质的不同,分为水溶液电化学冶金和熔盐电化学冶金。

1. 水溶液电化学冶金

水溶液电化学冶金是以溶有金属离子的水溶液作为电解质,利用电能转化的化学能使溶液中的金属离子还原为金属析出,或使粗金属阳极经由溶液精炼沉积于阴极的冶金过程。水溶液电解过程也可以把含杂质的金属作为阳极,电解过程使其不断溶解到水溶液中,并在阴极析出,叫作电解精炼(可溶阳极电解),例如金、银、钴、镍、铜等贵金属大多采用电解精炼来获得高纯成分;若阳极材料本身不参与电解过程,只是把湿法冶金中获得的浸取液中的金属在阴极沉淀析出的过程,则叫作电解提取(不溶阳极电解),例如锌、铬、锰的提取。

2. 熔盐电化学冶金

熔盐电化学冶金是利用电能加热并转化为化学能,将某些金属的盐类熔融并作为电解质进行电解,自熔盐中还原金属,以提取和提纯金属的冶金过程。该方法主要用于不溶于水的金属盐类,例如铝、镁、钠等活泼金属。由于金属能溶于熔盐,或者与高价氧化物反应生成低价化合物重新溶入熔盐,熔盐电解的电流效率要低于水溶液电解。

冶金方法的选择和应用,有时可能是单一的,有时可能是火法冶金和湿法冶金联合使用的过程。冶金方法的选用应本着节约能源、保护环境以及综合利用的原则。一般情况下,黑色金属冶炼,由于矿石成分比较单一,通常采用火法冶金方法,即使有的矿石较为复杂,通过火法冶金之后,也能使其伴生的有色金属进入渣中,进行再处理,例如高炉冶炼用钒钛铁矿就属于这种类型。有色金属的冶炼,由于其矿石或精矿的矿物成分极其复杂,含有多种金属矿物,不仅要提取或提纯某种金属,同时还要综合考虑回收各种有价值的其他金属成分,以充分利用资源和降低生产费用。因此,这种情况下考虑冶金方法时要用两种或两种以上方法才能完成。重金属的冶炼,因常以硫化矿为主要原料,故工艺流程以火法为主、湿法为辅。轻金属的密度小、活性大,多采用熔盐电解法和金属热还原法进行生产。国外铝、镁、铁的冶炼技术,主要是向大型化、高效率、低能耗及应用电子计算机、工艺过程控制自动化方向发展。金、银、铂等贵金属的冶炼,一部分可由矿石提取,而大部分都是从铜、镍、铅、锌冶炼厂的副产品(阳极泥)中回收的。稀有金属在地壳中分布过于分散,没有集中的矿床,只能从金属工厂或化工厂的废料中提取。

1.3 金属的物理性能

1.3.1 密度

密度是指单位体积物质的质量。国际单位为千克每立方米(kg/m^3),对于液体或者气体,还可用千克每升(kg/L)表示。密度是物质的一种特性,不随质量和体积的变化而变化,只随物态温度、压强的变化而变化。

1.3.2 热性能

物质的热性能包括热容、热传导、热膨胀等,是金属及合金的主要物理性能之一。它在金

属材料相变等研究中,具有重要理论意义,在工程技术中也占有重要位置,例如选用热学参数合适的材料,可以节约能源、提高机械效率、延长材料的使用寿命等。

一、熔点

金属和合金由固体状态向液体状态转变时的熔化温度叫作熔点(melting point)。

物质分为晶体和非晶体,晶体有熔点,而非晶体没有熔点。晶体又因类型不同而熔点不同。一般来说,晶体的熔点从高到低为:原子晶体>离子晶体>金属晶体>分子晶体。

物质的熔点并不是固定不变的,有两个因素对熔点的影响很大。一是压强,通常所说的物质的熔点,是指一个大气压时的情况,如果压强变化,熔点也会发生变化,熔点随压强的变化有两种不同情况:对于大多数物质,熔化过程是体积变大的过程,当压强增大时,物质的熔点升高;而对于像水这样的物质,与大多数物质不同,冰融化成水的过程中其体积要缩小(金属铋、铊等也是如此),故当压强增大时冰的熔点降低。二是物质中的杂质,通常所说的物质的熔点,是指纯净的物质。但在现实生活中,大部分物质都是含有其他物质的,比如在纯净的液态物质中溶有少量其他物质,或称为杂质,即使数量很少,物质的熔点也会有很大变化,例如水中溶有盐,熔点就会明显下降,海水就是溶有盐的水,海水冬天结冰的温度比河水低,就是这个原因。饱和食盐水的熔点可下降到约 -22°C ,北方的城市在冬天下大雪时,常常往公路的积雪上撒盐,此时只要温度高于 -22°C ,足够的盐便可以使冰雪融化。

熔点实质上是物质固、液两相可以共存并处于平衡的温度,以冰融化成水为例,在一个大气压下冰的熔点是 0°C ,而温度为 0°C 时,冰和水可以共存,如果与外界没有热交换,冰和水共存的状态可以长期保持稳定。在各种晶体中粒子之间相互作用力不同,因而熔点各不相同。同一种晶体,熔点与压强有关,一般取在1大气压下物质的熔点为正常熔点。在一定压强下,晶体物质的熔点和凝固点都相同。溶解时体积膨胀的物质,在压强增加时熔点升高。

钨(W)是熔点最高的金属,在 $2\,000\sim 2\,500^{\circ}\text{C}$ 高温下,蒸气压仍很低。钨的硬度大,密度高,高温强度高。

二、比热容

一定质量的物质,当温度升高时,所吸收的热量与该物质的质量、升高的温度乘积之比,称为比热容(specific heat capacity),又称比热容量,简称比热(specific heat),用符号 c 表示,是单位质量物质的热容量,即单位质量物体改变单位温度时吸收或释放的内能。单位为焦耳每千克摄氏度($\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$)。

$$c=Q/m\cdot\Delta t \quad (1-1)$$

三、导热性

金属传导热量的性能叫作导热性(thermal conductivity),其反映了金属在加热和冷却时的导热能力。导热性的大小用导热系数来衡量,导热系数定义为物体上下表面温度相差 1°C 时,单位时间内通过导体横截面的热量,符号为 λ ,单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。在纯金属中,银(约418.6)和铜(约393.5)的导热性最好。

导热率:又称导热系数或热导率,是表示材料热传导能力大小的物理量。材料的导热率随成分、物理结构、物质状态、温度、压力等而变化。

傅里叶方程为

$$Q=KA \cdot \Delta T/d \tag{1-2}$$

$$R=\Delta T/Q \tag{1-3}$$

式中, Q 为热量; K 为导热率($W/(m \cdot K)$); A 为接触面积; d 为热量传递距; ΔT 为温度差; R 为热阻值。

导热率 K 是材料本身的固有性能参数,用于描述材料的导热能力。该特性与材料本身的大小、形状、厚度无关,只与材料本身的成分有关。因此,同类材料的导热率是相同的,并不会因为厚度不同而变化。

四、热膨胀性

金属温度升高时体积发生膨大的现象称为金属的热膨胀性。例如,被焊的工件由于受热不均匀而产生不均匀的热膨胀,会导致焊件的变形和焊接应力。衡量热膨胀性的指标为热膨胀系数。

热膨胀系数:物体由于温度改变而产生胀缩现象。其变化能力以等压(p 一定)下,单位温度变化所导致的长度量值变化,即热膨胀系数表示。大多数情况下,此系数为正值。

线膨胀系数:有时也称为线弹性系数(linear expansivity),表示材料膨胀或收缩的程度。分为某一温度点的线膨胀系数和某一温度区间的线膨胀系数,前者是单位长度的材料每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的伸长量;后者称为平均线膨胀系数。平均线膨胀系数是单位长度的材料在某一温度区间,每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度的平均伸长量。

线膨胀系数为

$$\alpha=\Delta L/(L \cdot \Delta T) \tag{1-4}$$

式中, ΔL 为所给长度的变化; ΔT 为物体温度的变化; L 为初始长度。

部分金属的结膨胀系数如表 1-1 所示。

表 1-1 部分金属的线膨胀系数

金属名称	元素符号	线膨胀系数(1/°C)	金属名称	元素符号	线膨胀系数(1/°C)
铍	Be	12.3	铝	Al	23.2
锑	Sb	10.5	铅	Pb	29.3
铜	Cu	17.5	镉	Cd	41.0
铬	Cr	6.2	铁	Fe	12.2
锗	Ge	6.0	金	Au	14.2
铱	Ir	6.5	镁	Mg	26.0
锰	Mn	23.0	钼	Mo	5.2
镍	Ni	13.0	铂	Pt	9.0
银	Ag	19.5	锡	Sn	2.0

严格说来,式(1-4)是温度变化范围不大时的微分定义式的差分近似;准确定义要求 ΔL 与 ΔT 无限微小,即线膨胀系数在较大的温度区间内通常不是常量。

相应地,面膨胀系数为

$$\beta = \Delta S / (S \cdot \Delta T) \quad (1-5)$$

体膨胀系数为

$$\gamma = \Delta V / (V \cdot \Delta T) \quad (1-6)$$

对于三维的具有各向异性的物质,有面膨胀系数和体膨胀系数之分。例如,石墨结构具有显著的各向异性,因而石墨纤维线膨胀系数也呈现出各向异性,表现为平行于层面方向的热膨胀系数远小于垂直于层面方向。

1.3.3 电性能

金属传导电流的能力叫作导电性(electrical conductivity)。衡量金属导电性能的指标是电导率(又称导电系数)和电阻率(又称电阻系数),电阻率和电导率互成反比,电导率越大,则电阻率越小。

不同金属的导电性各不相同,通常银的导电性最好,其次是铜和金。固体导电是指固体中的电子或离子在电场作用下的远程迁移,通常以一种类型的电荷载体为主。例如:电子导电,以电子载流子为主体的导电;离子导电,以离子载流子为主体的导电;混合型导体,其载流子电子和离子兼而有之。除此之外,有些电现象并不是由于载流子迁移所引起的,而是电场作用下诱发固体极化所引起的,例如介电现象和介电材料等。

(1)电导率(conductivity):物理学概念,指在介质中电荷量与电场强度之积等于传导电流密度。对于各向同性介质,电导率是标量;对于各向异性介质,电导率是矢量。I. A. C. S电导率百分值为I. A. C. S体积电导率百分值或I. A. C. S质量电导率百分值,其值为国际退火标准规定的电阻率(不管是体积和质量的)对相同单位电阻率之比乘以100,例如铜体积电阻率推导的电导率公式为 $(0.017\ 241/P) \times 100$,其中 P 为电试样体积电阻率。

电导率是用来描述物质中电荷流动难易程度的参数。公式中,电导率用 G 来表示。电导率的标准单位是西[门子]每米(S/m),即原 $1/\Omega$ 。

当1安培(A)电流通过物体的横截面并存在1伏特(V)电压时,物体的电导率为1 S。西门子实际上等效于 1 A/V 。如果 G 为电导率, I 为电流(单位是安培), E 为电压(单位是伏特),则

$$G = I/E \quad (1-7)$$

若一个组件或者设备的电阻为 R ,电导率为 G ,则

$$G = 1/R \quad (1-8)$$

(2)电阻率:电阻率(resistivity)是用来表示各种物质电阻特性的物理量。某种材料制成的长1 m,横截面积是 1 mm^2 的导线的电阻叫作这种材料的电阻率。电阻率与导体的长度、横截面积等因素无关,是导体材料本身的电学性质,由导体的材料决定,且与温度有关。国际单位制中的单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

在温度一定的情况下,有公式 $R = \rho l/S$,其中, ρ 为电阻率, l 为材料的长度, S 为横截面积。可以看出,材料的电阻大小与材料的长度成正比,而与其截面积成反比。

1.3.4 磁性能

广义上能吸引铁、钴、镍等物质的性质称为磁性。物质放在不均匀的磁场中会受到磁力的

作用。在相同的不均匀磁场中由单位质量的物质所受到的磁力方向和强度来确定物质磁性的强弱。因为任何物质都具有磁性,所以任何物质在不均匀磁场中都会受到磁力的作用。

磁体两端磁性最强的区域称为磁极,一端为北极(N极),另一端为南极(S极)。铁中有许多具有两个异性磁极的原磁体,在无外磁场作用时,这些原磁体排列紊乱,它们的磁性相互抵消,对外不显示磁性。当把铁靠近磁铁时,这些原磁体在磁铁的作用下,整齐地排列起来,使靠近磁铁的一端具有与磁铁极性相反的极性而相互吸引,表明铁中由于原磁体的存在而能够被磁铁所磁化。而铜、铝等金属是没有原磁体结构的,故不能被磁铁所吸引。

运动的带电粒子在磁场中会受到洛伦兹(Lorentz)力的作用,由相同带电粒子在不同磁场中所受到洛伦兹力的大小来确定磁场强度的高低。特斯拉(T)是磁通密度的国际单位。磁通密度是描述磁场的基本物理量,而磁场强度是描述磁场的辅助量。特斯拉(Tesla · N)(1886—1943)是克罗地亚裔美国电机工程师,曾发明变压器和交流电动机。

原子本征磁矩:材料的磁性来源于原子磁矩。电子绕原子核运动,如同形成一环形电流,环形电流在其运动中心处产生磁矩。

抗磁性(diamagnetism)是指一种弱磁性。组成物质的原子中,运动的电子在磁场中受电磁感应而表现出的属性。外加磁场使电子轨道动量矩绕磁场运动,产生与磁场方向相反的附加磁矩,磁化率 k 抗为很小的负值($10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级)。因此,所有物质都具有抗磁性。

大多数物质的抗磁性被其顺磁性所掩盖,只有一小部分物质表现出抗磁性。惰性气体原子表现出的抗磁性可直接测量。一些离子的抗磁性只能从其他测量结果中推算得到。这些物质的 k 抗的绝对值与原子序数 Z 成正比,并与外层电子的轨道半径的平方成正比,与温度的变化无关,称为正常抗磁性。少数材料(例如Bi, Sb等)的 k 抗比较大(可达 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 量级),随温度上升变化较快,称为反常抗磁性。早年曾用Bi做测量磁场的传感器材料。金属中自由电子也具有抗磁性,并与温度无关,称为朗道抗磁性。但因其绝对值为其顺磁性的 $1/3$,自由电子的抗磁性始终被掩盖、不易测量。在特殊条件下,金属的抗磁性随磁场的变化有振荡特征,称为德哈斯-范阿尔文效应,是费米面测量的重要方法。超导体中有超导电流、存在迈斯纳效应时,具有很强的抗磁性,其抗磁磁导率为 -4π 。

顺磁性(paramagnetism)是指材料对磁场响应很弱的磁性。用磁化率 $k=M/H$ 来表示(M 和 H 分别为磁化强度和磁场强度),从这个关系来看,磁化率 k 是正的,即磁化强度的方向与磁场强度的方向相同,数值为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 量级。

从原子结构来看,组成顺磁性物体的原子、离子或分子具有未被电子填满的内壳层,如图1-1所示。这类材料的原子、离子或分子中存在固有磁矩,因其相互作用远小于热运动能,磁矩的取向无规则,使材料不能形成自发磁化。在经典理论中,磁矩在磁场中可取任意方向。所有这些材料中的原子或离子在磁场作用下所产生的磁矩都很小,如许多过渡金属和稀土元素的绝缘化合物,有机化合物中的自由基,以及少数顺磁性气体(如NO, O_2 等),在一般情况下磁化率随温度的变化遵从居里定律:

$$k=C/T \quad (1-9)$$

式中, C 为居里常数; T 为温度。

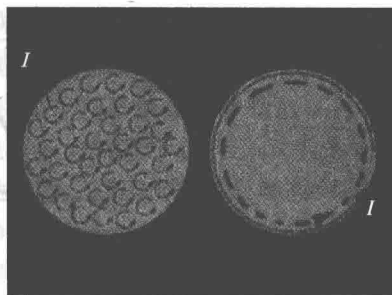


图1-1 原子的顺磁性

铁磁性(ferromagnetism):过渡族金属(例如铁)及其合金、化合物所具有的磁性叫作铁磁性。物质中相邻原子或离子的磁矩由于相互作用而在某些区域中大致按同一方向排列,当所施加的磁场强度增大时,这些区域的合磁矩定向排列程度会随之增加到某一极限值的现象,称为铁磁性。

在铁磁性物质内部,与顺磁性物质相类似,有很多未配对电子。由于交换作用(exchange interaction),这些电子的自旋趋于与相邻未配对电子的自旋呈相同方向。铁磁性物质内部又分为很多磁畴,虽然磁畴内部所有电子的自旋会单向排列,造成“饱和磁矩”,但是磁畴与磁畴之间磁矩的方向与大小都不相同。因此,未被磁化的铁磁性物质,其净磁矩与磁化矢量都等于零。

假设施加外磁场,这些磁畴的磁矩还趋向于与外磁场相同方向,从而形成有可能相当强烈的磁化矢量与其感应磁场。随着外磁场的增高,磁化强度也会增高,直到“饱和点”,净磁矩等于饱和磁矩。这时,再增高外磁场也不会改变磁化强度。假设减弱外磁场,磁化强度也会随之减弱,但是不会与先前对于同一外磁场的磁化强度相同。磁化强度与外磁场的关系不是一一对应的关系。磁化强度与外磁场呈线性关系。

假设到达饱和点后,撤除外磁场,则铁磁性物质仍能保存一些磁化的状态,净磁矩与磁化矢量不等于零。因此,经过磁化处理后的铁磁性物质具有“自发磁矩”。

磁滞回线:铁磁性材料的磁化强度与外磁场呈非线性关系。这种关系是一条闭合曲线,该曲线称为磁滞回线。一般来讲,铁磁体等强磁物质的磁化强度 M 或磁感应强度 B 不是磁场强度 H 的单值函数,而依赖于其所经历的磁状态历史。以 $H=M=B=0$ 为起始状态,当磁化曲线由 $OABC$ 到 C 点时,此时磁化强度趋于饱和,记为 M_s 。若减小磁场,则从 B 开始 M 随 H 的变化偏离起始磁化曲线, M 的变化落后于 H 。当 H 减小至 0 时, M 不为 0,而等于剩余磁化强度 M_r 。为使 M 为 0,需加一个反向磁场,即为磁矫顽场 H_c 。继续增大反向磁场至 H_c 时,磁化强度 M 将沿反方向磁化至 M_s 。如图 1-2 所示,曲线 $BDEGB$ 即为磁滞回线。

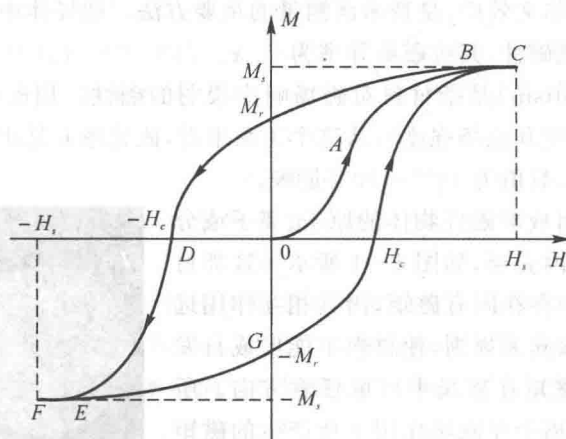


图 1-2 磁滞回线

反铁磁性:在原子自旋(磁矩)受交换作用而呈现有序排列的磁性材料中,如果相邻原子自旋间受负的交换作用,自旋为反平行排列,则磁矩虽处于有序状态,但总的净磁矩在不受外场作用时仍为零,这种磁有序状态称为反铁磁性。