

Cu

# 铜加工技术

## 实用手册

TONGJIAGONG  
JISHU

SHIYONG  
SHOUCE

主 编 钟卫佳  
副主编 马可定  
吴维治



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

# Cu 铜加工技术 实用手册

TONGJIAGONG  
JISHU

主 编 钟卫佳  
副主编 马可定  
吴维治

SHIYON  
SHOUCE

江苏工业学院图书馆  
藏书章

北京  
冶金工业出版社  
2007

## 内 容 简 介

本《手册》是由中铝洛阳铜业有限公司与冶金工业出版社共同组织,国内 20 多家主要铜加工企业、科研设计院所、大专院校的百余名专家、学者和工程技术人员参与撰写的大型实用性工具书。

《手册》全面总结了我国近 20 年来铜加工工业,特别是铜加工技术方面所取得的成就和经验,系统地介绍了铜加工工业的产品、工艺、技术和装备,尤其对铜加工工业的新产品、新工艺、新技术和新设备进行了详细介绍,内容丰富、翔实,实用性强。

《手册》共分 8 篇,51 章。第 1 篇:概论;第 2 篇:变形铜及铜合金;第 3 篇:铜及铜合金熔炼与铸造技术;第 4 篇:铜加工技术;第 5 篇:铜合金板、带、箔材生产;第 6 篇:铜合金管、棒、型、线材生产;第 7 篇:铜加工过程及产品检测技术;第 8 篇:工厂设计。

本《手册》是铜加工企业及科研设计院所的工程技术人员和研究人员必备的工具书;也可供从事金属材料生产、科研、设计、产品开发与深加工的技术人员阅读;并可作为大专院校有关专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

铜加工技术实用手册/钟卫佳主编. —北京:冶金工业出版社,2007.1

ISBN 978-7-5024-4100-5

I. 铜… II. 钟… III. 铜—金属加工—技术手册  
IV. TG146.1-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 158098 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

策划编辑 张登科(电话:010-64062877 E-mail:zhdengke@sina.com)

责任编辑 张登科 王雪涛 美术编辑 王耀忠

责任校对 刘倩 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2007 年 1 月第 1 版,2007 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 86.25 印张; 2258 千字; 1349 页; 1-4500 册

268.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 编辑委员会

主任 钟卫佳  
副主任 刘劲波 郭照相 冯海良 刘光汉 白常厚  
委员 (按姓氏笔画排序)  
马可定 方守谊 白常厚 冯海良 刘光汉 刘劲波  
刘建华 陈小祝 陈明勇 汪明朴 张金利 张登科  
李彦利 李惠中 吴维治 钟卫佳 倪如宝 浦益龙  
郭照相 崔建中 戚建萍 康福林 谢水生

## 编写委员会

主编 钟卫佳  
副主编 马可定 吴维治  
委员 (按姓氏笔画排序)  
马可定 汪明朴 肖恩奎 吴维治 李耀群  
钟卫佳 娄花芬 郭莉 曹建国 梅恒星

责任编辑 张登科 王雪涛

## 主要参编单位

中铝洛阳铜业有限公司  
洛阳有色金属加工设计研究院  
江苏高新张铜股份有限公司  
浙江海亮集团有限公司  
广东太平洋铜管有限公司  
沈阳铜兴铜业有限公司  
中南大学  
北京有色金属研究总院  
上海金泰铜业有限公司  
宁波金田铜业股份有限公司  
广州铜材厂有限公司  
河南金龙精密铜管有限公司  
无锡隆达金属材料有限公司  
铜陵有色金属(集团)公司  
浙江宏磊集团有限公司  
上海第一铜棒厂  
江苏万宝铜业集团有限公司  
东北大学  
西北铜加工厂  
长沙铜铝材有限公司

# 序

铜及铜合金是既具有悠久历史,又充满勃勃生机的金属材料,它曾是人类文明史上的里程碑和划分时代的标志,又是当今现代化程度的指标之一。

铜及铜合金具有一系列的优异特性:导电、导热、耐蚀、耐磨、抑菌、可镀、装饰、易加工等,它广泛用于电力、电子、通讯、化工、机械、交通运输、海洋工程、航空航天、建筑装饰等领域,在人类生活和国民经济中发挥着巨大作用。特别是随着人们物质文化生活水平的提高和信息时代的到来,铜及铜合金已经并将继续成为与人类生活密不可分的重要基础材料。

近几十年来,我国铜加工业发生了巨大的变化:铜加工材产量由1985年的59万t增加到2005年的510万t,成为世界铜加工材生产第一大国。同时我国建成了几十条现代化的生产线,工艺、技术、装备水平不断提高,一大批高精尖产品不但满足国内经济建设的需要,而且还大量出口国外。作为一名在有色金属工业行业工作了几十年的老科技工作者,我亲身经历和目睹了我国铜加工业从无到有,从分散、落后到规模大、水平高的发展过程,对此深感高兴和骄傲。当然,我们也应当清楚地看到,我国铜加工业与国际先进水平相比还有很大的差距,特别是自主创新能力还比较低。因此,我建议:要继续深化改革,加快公司制改造步伐;继续进行结构调整,不断扩大专业化生产比例;加大技术更新改造力度,加快消化吸收的步伐;增加对科技投入的比例,促进技术创新平台建设,提高自主创新能力;加强产、学、研的联合和协作,缩短科技成果向生产力转化的进程;注重环境保护和资源再生利用,使铜加工领域向纵深扩展,走循环经济的发展道路。我深信,我国铜加工业的明天将会更加灿烂辉煌。

1979年出版的《重有色金属材料加工手册》,曾凝聚了我国老一辈有色金属科技工作者的聪明才智,对我国铜加工业的发展起到了巨大的作用,惠及几代人。这部《手册》是由原冶金工业部组织、冶金工业出版社出版的,可见其及时组织与出版意义之重大。然而,20多年过去了,铜加工业发生了翻天覆地的变化,出现了许多新材料、新工艺、新技术、新产品和新成果,对这些新技术、新成果等进行及时和全面的总结同样具有非凡的意义,它必将对我国铜加工业的进一步发展产生深远的影响。

现在这样一本全新的《铜加工技术实用手册》(简称手册)呈现在读者面前,它是铜加工业百余名专家、学者和工程技术人员经过两年多辛勤的工作和共同努力

的结果,凝聚了他们的心血、汗水和智慧。《手册》共分8篇,51章,200多万字,可以说是一部鸿篇巨著。统览全书我觉得有以下几个显著特点:

**新颖**——几乎囊括了当今国内外铜加工领域全部新材料、新产品、新工艺、新技术、新成果,充分反映了我国近几十年来铜加工技术发展的新面貌,总结了生产、科研的新经验,传递了许多全新的信息,研究分析了新时期铜加工技术发展的新特点和新动向。

**全面**——不但介绍合金材料的性能,还提供了合金设计的原则和方法;不但重点介绍了熔铸、轧制、挤压、拉伸等成形技术,还系统介绍了以前常被人们忽视的各种相关辅助技术、检测技术、安全环保技术;不但重点介绍了铜加工的常用技术,还介绍了铜合金的特殊加工技术、深加工技术、回收利用技术和工厂设计技术;全面总结和反映了已有的技术现状,分析和预测了铜加工技术的发展趋势等。

**实用**——有关原理、理论性的阐述简明扼要,对现场实践经验的总结丰富详细,同时提供了大量实用性的图、表和公式,非常便于查阅和应用。

应当特别指出的是,我国铜资源十分有限,其人均铜资源拥有量只是世界人均拥有量的四分之一,作为世界上铜消费第一大国,如何节约铜资源和再生利用尤为重要。为此,《手册》中设专章论述了“铜材的再生和利用”,这将对铜业的可持续发展和实现循环经济有所裨益。

这是一本既有继承又有发展的好书,它充分肯定了1979年出版的《重有色金属材料加工手册》的历史功绩,承其精华,又深度汲取和全面总结了20多年来铜加工业发展所取得的新经验、新技术等,形成了自己的新风格。

《手册》的编撰是一项庞大的系统工程,在其即将出版之际,我对全体编写人员、出版人员和支持、帮助《手册》编写和出版的单位和个人表示衷心的感谢,感谢他们的辛勤劳动和支持,感谢他们为我国铜加工事业的发展与技术进步做了一件具有深远意义的工作,为我国铜加工领域又增添了一部符合国情、很具实用价值的好书。

当然,铜加工工业正处于蓬勃发展的时期,《手册》不可能收集到所有的新技术、新成果等,局限和不妥之处还望读者见谅,参加编写的作者也期望指正,更期待有更多的著作来丰富铜加工业的知识宝库。

让我们共同努力,为把我国铜加工业建成世界铜加工材生产基地和铜加工技术创新基地,为铜加工工业的快速发展做出更大的贡献。

中国工程院院士

左洪涛

2006年8月

# 前 言

随着我国经济的高速发展,我国铜加工工业的规模迅速扩大,铜加工技术全面更新,出现了许多新材料、新技术、新工艺和新装备。比较而言,1979年出版的《重有色金属材料加工手册》其内容已显陈旧,且远不能满足铜加工业快速发展的新要求,许多业内人士希望组织出版一本全面总结20多年来我国铜加工业所取得的成就和经验的新技术手册,以适应铜加工工业迅速发展的需要。为此,中铝洛阳铜业有限公司与冶金工业出版社共同协商,由中国有色金属加工工业协会重有色分会出面,以中铝洛阳铜业有限公司为核心,发起并组织编写《铜加工技术实用手册》(以下简称手册)。这一倡议得到了行业内主要企业、科研设计院以及大专院校的积极响应。2004年2月17日在洛阳召开了《手册》编写工作会议。会议听取了《手册》主编钟卫佳先生关于《手册》编写筹备情况的报告。与会代表就编写《手册》的目的、意义、编委会的组成、权利和义务、编写计划和要求、《手册》目录等进行了讨论。冶金工业出版社的有关负责同志就编写出版事宜作了说明,并对编写《手册》工作给予了高度评价,认为这是一件惠及国家、行业和企业的好事情。经过全体代表的友好协商和共同努力,达成如下主要共识:

1. 1979年由洛阳铜加工厂任组长单位组织编写、由冶金工业出版社出版的《重有色金属材料加工手册》是老一辈重有色金属加工专家,特别是铜加工技术专家及学者智慧的结晶,它理论联系实际,系统地反映了我国改革开放前铜加工等重有色金属加工业的实践经验和水平,资料详尽实用,深受铜加工生产、管理、开发和应用的广大读者的喜爱和好评,成为铜加工科技工作者案头必备的工具书,为我国铜加工工业的发展做出了巨大贡献,泽惠几代人。改革开放后的20多年来,我国铜加工业发生了很大变化,现已成为世界铜材生产基地,一大批新技术、新工艺、新材料、新装备得到推广和应用,建成了几十条现代化的生产线,开发了许多新合金、新产品。随着铜加工业的飞速发展,人们迫切要求编写出版一本能充分反映这些新技术、新工艺、新材料、新装备和新产品的技术手册,一本能充分总结20多年来铜加工生产和技术开发经验、面向实际应用的工具书。因此,决定共同组成《手册》编写委员会,通力合作,编写好《手册》,向读者奉献一本好书。

2. 经过充分协商,一致推选中铝洛阳铜业有限公司为编辑委员会主任单位;洛阳有色金属加工设计研究院、浙江海亮集团有限公司、江苏高新张铜股份有限公司、广东太平洋铜管有限公司、沈阳铜兴铜业有限公司为副主任单位;其他参编



IV

单位为委员单位,组成编辑委员会,共同组织编写《手册》工作,同时欢迎业内其他单位参与和支持。

3. 一致同意聘请中铝洛阳铜业有限公司钟卫佳先生担任《手册》主编,聘请马可定先生、吴维治先生担任《手册》副主编,并全权负责《手册》的编写组织和审定工作。

根据编委会的建议和充分发挥各参编单位积极性的原则,《手册》聘请了行业内的专家、学者撰稿,各篇由专人负责,第1篇:娄花芬;第2篇:汪明朴;第3篇:肖恩奎;第4篇:马可定;第5篇:吴维治、娄花芬;第6篇:李耀群、郭莉;第7篇:梅恒星;第8篇:吴维治。经过集体初审、再审,专家专审(主要审稿专家有:董万余、钟致政、刘永亮、曹建国、刘光汉、吕德贵、方守谊、谢建新、谢水生等),最后由副主编马可定、吴维治修改统编,主编钟卫佳审定。

参加《手册》的撰稿人员有:中铝洛阳铜业有限公司的钟卫佳、马可定、肖恩奎、刘永亮、娄花芬、梅恒星、郭慧稳、陈少华、曹先杰、牛立业、赵泽江、黄自欣、刘月梅、李建涛、黄亚飞、刘富良、张书远、王进举、张平、程万林、金泉、孙水珠、肖中亚、黄春梅、张文芹、胡萍霞、黄天增、孟惠娟、郭淑梅、张敬华、路俊攀、胡晓春、王庆彦、王永翔、李湘海、秦勇、徐红、王红军、朱群范、陈明华、狄大江、邹建成、张建伟、曲刚、杜春生;洛阳有色金属加工设计研究院的吴维治、毕琳、刘光汉、朱学北、林道新、闫建设、张玉杰、赵明、肖翠萍、余显平;中南大学的尹志民、汪明朴、李周、宋练鹏、曹玲飞、李百治;东北大学的李宝绵;北京有色金属研究总院的谢水生、黄国杰、赵云豪;上海大学的钱俏鹞、蒋春蓉;大连理工大学的刘黎明;江苏高新张铜股份有限公司的李耀群、文继有、赵祥伟、万桂龙、朱卫光;浙江海亮集团有限公司的曹建国、赵学龙、居敏刚、冯建平;上海金泰铜业有限公司的方守谊;广州铜材厂有限公司的陈小祝;河南金龙精密铜管有限公司的董顺德、赵双、琚现超、刘滨、杨修堂;沈阳铜兴铜业有限公司的吕德贵、刘刚、王艳杰;西北铜加工厂的曹延年、周学智、罗晓玲;上海第一铜棒厂的姜功正;长沙铜铝材有限公司的周逵、李卫、潘志勇、李宏英、张玉武、黄大可、金庆贵、刘耀辉、于克桂;宁波金田铜业股份有限公司的王永如、洪燮平、李惠中、张学士、李红卫;江苏万宝铜业集团有限公司的钟致政;芜湖恒鑫铜业有限公司的吴昌业;铜陵有色金属(集团)公司的刘敦伟等。

《手册》共分8篇,51章,200多万字。第1篇:概论;第2篇:变形铜及铜合金;第3篇:铜合金熔炼与铸造技术;第4篇:铜加工技术;第5篇:铜合金板、带、箔材生产;第6篇:铜合金管、棒、型、线材生产;第7篇:铜加工过程及产品检测技术;第8篇:工厂设计。共有插图1200余幅、表格1160多个、公式2000多个。

《手册》力求科学性、先进性和实用性统一。科学性:坚持实事求是,言之有据。先进性:充分反映和总结国内外现代铜加工领域的新技术、新工艺、新设备、新材料和新经验。实用性:理论阐述尽可能简明扼要,着重介绍解决问题的思路、方法和应注意的问题,既讲普遍性,又讲特殊性,尽可能提供典型工艺参数;既讲

基本原理,更突出关键技术和控制要点;尽量采用图表,方便查阅。作者和编审人员较好地贯彻了上述原则,使《手册》具有如下特点:

**内容新**——充分反映了铜加工业最近 20 多年来的新技术、新工艺、新设备、新材料、新经验以及新的发展趋势。

**资料全**——几乎涵盖了铜加工的所有产品及其加工技术,特别增加了辅助技术的内容。

**很实用**——无论是合金材料设计、工艺设计、工厂设计,还是生产技术,都强化了操作层面上的介绍和阐述,突出了生产中的可操作性和实用性。

在《手册》的编写过程中,得到了编委会各成员单位的大力支持,很多业内人士提供了许多帮助,同时冶金工业出版社一直参与组织并给予具体指导,在此一并表示衷心感谢。

在《手册》的编写过程中,参考了国内外许多专家、学者的有关资料、研究成果和著作等,在此表示真诚的谢意。

由于本书涉及面广、内容多、编写人员多,尽管经过反复修改、统编和审定,但在各章节资料的取舍、结构安排、内容协调、叙述风格以及其他方面难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编写委员会  
2006年8月

# 目 录

## 第1篇 概 论

1 铜及铜合金的特点和应用开发	3	1.5.1 铜加工产品开发与应用的特点	13
1.1 铜的基本特点和应用	3	1.5.2 高性能铜加工产品发展现状及特点	14
1.1.1 导电、导热性	3	1.5.3 我国铜加工材的发展现状及趋势	15
1.1.2 耐蚀性	3	2 铜加工技术及发展趋势	17
1.1.3 易加工成形性	3	2.1 铜加工技术	17
1.1.4 其他特性	4	2.1.1 熔炼铸造技术及发展趋势	17
1.2 铜及铜合金分类	4	2.1.2 铸锭加热技术及发展趋势	18
1.2.1 按合金系划分	4	2.1.3 板带材加工技术及发展趋势	19
1.2.2 按功能划分	4	2.1.4 管棒线材加工技术及发展趋势	20
1.2.3 按材料成形方法划分	5	2.2 高性能铜合金材料制备及产品加工新技术	24
1.3 铜及铜合金材料的发展趋势	5	2.2.1 快速凝固技术	24
1.3.1 高纯化	5	2.2.2 定向凝固及单晶铜制备技术	24
1.3.2 微合金化	5	2.2.3 铜基复合材料制备新技术	24
1.3.3 复杂多元铜合金化	6	2.2.4 形变热处理技术	25
1.3.4 复合材料化	6		
1.4 铜加工产品分类	7		
1.4.1 板带箔材	7		
1.4.2 管棒线材	7		
1.5 铜加工产品发展特点及趋势	13		

## 第2篇 变形铜及铜合金

3 铜合金设计原理	29	3.1.7 添加微量元素	31
3.1 合金设计的原理和方法	29	3.2 合金设计的基本原则	32
3.1.1 固溶强化	30	3.3 合金设计的一般过程	32
3.1.2 沉淀强化	30	3.4 铜合金的设计开发途径和方法	33
3.1.3 细晶强化	31	3.4.1 高强高导铜合金的设计开发	34
3.1.4 形变强化	31	3.4.2 耐磨铜合金的设计开发	36
3.1.5 复合材料强化	31	3.4.3 耐腐蚀铜合金的设计开发	38
3.1.6 合金的韧化	31		

3.4.4 高弹性铜合金的设计开发	40	5.5.8 选材与应用实例	113
<b>4 铜合金相图</b>	44	<b>5.6 弥散强化无氧铜</b>	114
4.1 概述	44	5.6.1 概述	114
4.1.1 金属相与晶体结构	44	5.6.2 牌号	114
4.1.2 相平衡条件与相律	47	5.6.3 化学成分	114
4.1.3 相图、杠杆定律、重心法则	47	5.6.4 物理化学性能	115
4.2 铜合金二元相图	50	5.6.5 热加工和热处理规范	115
4.3 铜合金三元相图	60	5.6.6 力学性能	115
<b>5 紫铜</b>	73	5.6.7 工艺性能	118
5.1 合金元素对铜的性能的影响	73	5.6.8 选材和应用实例	119
5.1.1 氧对铜的性能的影响	74	<b>6 黄铜</b>	120
5.1.2 其他元素等对铜性能的影响	77	6.1 普通黄铜	120
5.2 紫铜的分类	82	6.1.1 概述	120
5.3 普通纯铜	83	6.1.2 合金牌号、特点和应用	121
5.3.1 概述	83	6.1.3 化学成分	121
5.3.2 牌号	83	6.1.4 物理化学性能	122
5.3.3 化学成分	83	6.1.5 热加工和热处理规范	124
5.3.4 物理及化学性能	84	6.1.6 力学性能	126
5.3.5 热加工与热处理规范	88	6.1.7 工艺性能	131
5.3.6 力学性能	88	6.2 铅黄铜	131
5.3.7 工艺性能	100	6.2.1 概述	131
5.3.8 选材与应用实例	100	6.2.2 合金牌号、特点和应用	132
5.4 磷脱氧铜	101	6.2.3 化学成分	132
5.4.1 概述	101	6.2.4 物理化学性能	133
5.4.2 牌号	102	6.2.5 热加工与热处理规范	133
5.4.3 化学成分	102	6.2.6 力学性能	133
5.4.4 物理及化学性能	102	6.2.7 工艺性能	135
5.4.5 热加工与热处理规范	103	6.3 锡黄铜	136
5.4.6 力学性能	103	6.3.1 概述	136
5.4.7 工艺性能	107	6.3.2 合金牌号、特点和应用	136
5.4.8 选材与应用实例	107	6.3.3 化学成分	136
5.5 无氧铜	108	6.3.4 物理化学性能	136
5.5.1 概述	108	6.3.5 热加工和热处理规范	136
5.5.2 牌号	108	6.3.6 力学性能	137
5.5.3 化学成分	108	6.3.7 工艺性能	137
5.5.4 物理化学性能	108	6.4 铁黄铜	138
5.5.5 热加工与热处理规范	109	6.4.1 概述	138
5.5.6 力学性能	109	6.4.2 合金牌号、特点和应用	138
5.5.7 工艺性能	112	6.4.3 化学成分	138
		6.4.4 物理和化学性能	139

6.4.5 热加工和热处理规范 .....	139	7.3.5 物理及化学性能 .....	154
6.4.6 力学性能 .....	139	7.3.6 热加工与热处理规范 .....	156
6.4.7 工艺性能 .....	139	7.3.7 力学性能 .....	156
6.5 铝黄铜 .....	140	7.3.8 工艺性能 .....	165
6.5.1 概述 .....	140	7.3.9 选材与应用实例 .....	165
6.5.2 合金牌号、特点和应用 .....	140	7.4 铝青铜 .....	165
6.5.3 化学成分 .....	140	7.4.1 概述 .....	165
6.5.4 物理和化学性能 .....	141	7.4.2 铝青铜 QA19-2 .....	166
6.5.5 热加工和热处理规范 .....	141	7.4.3 铝青铜 QA19-4 .....	168
6.5.6 力学性能 .....	141	7.4.4 铝青铜 QA110-3-1.5 .....	171
6.5.7 工艺性能 .....	143	7.4.5 铝青铜 QA110-4-4 .....	175
6.6 锰黄铜 .....	143	7.4.6 铝青铜 QA111-6-6 .....	178
6.6.1 概述 .....	143	7.5 铍青铜 .....	180
6.6.2 合金牌号、特点和应用 .....	143	7.5.1 概述 .....	180
6.6.3 化学成分 .....	143	7.5.2 合金牌号 .....	181
6.6.4 物理化学性能 .....	144	7.5.3 化学成分 .....	181
6.6.5 热加工和热处理规范 .....	144	7.5.4 物理与化学性能 .....	181
6.6.6 力学性能 .....	144	7.5.5 热加工与热处理规范 .....	183
6.6.7 工艺性能 .....	145	7.5.6 力学性能 .....	183
6.7 硅黄铜 .....	145	7.5.7 工艺性能 .....	192
6.7.1 概述 .....	145	7.5.8 选材与应用实例 .....	193
6.7.2 牌号和化学成分 .....	146	7.6 铬青铜 .....	193
6.7.3 其他性能 .....	146	7.6.1 概述 .....	193
6.7.4 热加工和热处理规范 .....	147	7.6.2 牌号、品种、规格和供应 状态 .....	194
6.8 镍黄铜 .....	147	7.6.3 化学成分 .....	194
6.8.1 概述 .....	147	7.6.4 物理及化学性能 .....	194
6.8.2 化学成分及物理、力学和 工艺性能 .....	147	7.6.5 热加工与热处理规范 .....	195
7 青铜 .....	149	7.6.6 力学性能 .....	195
7.1 概述 .....	149	7.6.7 工艺性能 .....	198
7.2 锡青铜 .....	149	7.6.8 选材与应用实例 .....	198
7.2.1 概述 .....	149	7.7 锆青铜 .....	198
7.2.2 锡青铜 QSn4-4-2.5 .....	149	7.7.1 概述 .....	198
7.2.3 锡青铜 QSn4-4-4 .....	151	7.7.2 合金牌号 .....	199
7.3 锡磷青铜 .....	153	7.7.3 锆青铜 QZr0.2 和锆青铜 QZr0.4 .....	199
7.3.1 概述 .....	153	7.7.4 锆青铜 C15000 .....	203
7.3.2 合金牌号 .....	153	7.7.5 锆青铜 C15100 .....	204
7.3.3 化学成分 .....	153	7.7.6 工艺性能 .....	205
7.3.4 锡磷青铜常见品种规格和 供货状态 .....	154	7.7.7 选材与应用实例 .....	205

7.8 铬锆青铜·····	205	7.12.5 热加工与热处理规范·····	216
7.8.1 概述·····	205	7.12.6 力学性能·····	216
7.8.2 合金牌号·····	206	7.12.7 工艺性能·····	217
7.8.3 化学成分·····	206	7.12.8 选材与应用实例·····	217
7.8.4 物理及化学性能·····	206	7.13 硅青铜·····	217
7.8.5 热加工与热处理规范·····	206	7.13.1 概述·····	217
7.8.6 力学性能·····	206	7.13.2 硅青铜 QSi3-1·····	217
7.8.7 工艺性能·····	207	7.13.3 硅青铜 QSi1-3·····	223
7.8.8 选材与应用实例·····	207	7.14 其他青铜·····	225
7.9 铁青铜·····	207	7.14.1 钴铬硅青铜·····	225
7.9.1 概述·····	207	7.14.2 钛青铜·····	228
7.9.2 合金牌号·····	207	7.14.3 Cu-Ag-Zr 合金·····	231
7.9.3 铁青铜 QFe1.0(C19200)·····	207	<b>8 白铜·····</b>	<b>233</b>
7.9.4 铁青铜 QFe0.1(C19210)·····	208	8.1 概述·····	233
7.9.5 铁青铜 QFe2.5(C19400)·····	209	8.2 白铜的牌号、特点和应用·····	233
7.9.6 铁青铜 C19500·····	210	8.2.1 白铜的牌号及分类·····	233
7.9.7 铁青铜 C19520·····	210	8.2.2 白铜的特点和应用·····	233
7.9.8 铁青铜 C19700·····	211	8.3 白铜的化学成分·····	235
7.10 镍硅青铜·····	211	8.4 白铜的物理、化学性能·····	236
7.10.1 概述·····	211	8.4.1 普通白铜的物理、化学性能·····	236
7.10.2 合金牌号·····	211	8.4.2 锌白铜的物理性能·····	237
7.10.3 化学成分·····	211	8.4.3 铁白铜的物理、化学性能·····	237
7.10.4 物理性能·····	212	8.4.4 锰白铜的物理、化学性能·····	238
7.10.5 热加工与热处理规范·····	212	8.4.5 铝白铜的物理、化学性能·····	240
7.10.6 力学性能·····	212	8.5 白铜典型的力学性能·····	240
7.10.7 选材与应用实例·····	212	8.5.1 普通白铜的力学性能·····	240
7.11 铜青铜·····	212	8.5.2 锌白铜的力学性能·····	242
7.11.1 概述·····	212	8.5.3 铁白铜的力学性能·····	243
7.11.2 合金牌号·····	212	8.5.4 锰白铜的力学性能·····	248
7.11.3 化学成分·····	213	8.5.5 铝白铜的力学性能·····	249
7.11.4 物理及化学性能·····	213	8.6 白铜的工艺性能及热加工和热处理规范·····	250
7.11.5 热加工与热处理规范·····	213	8.6.1 白铜的工艺性能及热加工和热处理规范·····	250
7.11.6 力学性能·····	213	8.6.2 白铜的应用·····	250
7.11.7 工艺性能·····	215	<b>9 特殊铜合金·····</b>	<b>252</b>
7.11.8 选材与应用实例·····	216	9.1 艺术用铜合金·····	252
7.12 镁青铜·····	216	9.1.1 概述·····	252
7.12.1 概述·····	216	9.1.2 艺术用紫铜·····	252
7.12.2 合金牌号·····	216		
7.12.3 化学成分·····	216		
7.12.4 物理及化学性能·····	216		

9.1.3 艺术用黄铜 .....	252	9.2.3 部分铜基形状记忆合金的 性能 .....	256
9.1.4 艺术用青铜 .....	253	9.2.4 铜基形状记忆合金的工艺 性能 .....	257
9.1.5 艺术用白铜 .....	255	9.2.5 铜基形状记忆合金的 应用 .....	257
9.2 铜基形状记忆合金 .....	255		
9.2.1 概述 .....	255		
9.2.2 铜基形状记忆合金种类 .....	256		

### 第3篇 铜及铜合金熔炼与铸造技术

<b>10 铜合金熔炼过程中的物理化学 行为</b> .....	263	11.3.4 熔剂保护及精炼 .....	292
10.1 熔炼过程的物理基础 .....	263	11.3.5 真空熔炼和电渣重熔 .....	295
10.1.1 熔化的物理过程 .....	263	11.4 熔炼及熔炼损失与污染 .....	295
10.1.2 金属的挥发 .....	263	11.4.1 装料及熔炼顺序 .....	295
10.1.3 液体铜的物理性质 .....	265	11.4.2 熔炼损失 .....	296
10.2 熔炼过程中的化学反应 .....	266	11.4.3 熔炼吸气 .....	297
10.2.1 氧化反应热力学条件 .....	266	11.4.4 杂质元素的积累 .....	298
10.2.2 氧化的动力学机制 .....	268	11.5 除气精炼 .....	299
10.2.3 铜的氧化与还原 .....	269	11.5.1 氧化除气法 .....	299
10.3 熔体中的气体 .....	273	11.5.2 沸腾除气法 .....	299
10.3.1 气体的形态 .....	273	11.5.3 惰性气体除气法 .....	300
10.3.2 气体的溶解度 .....	273	11.5.4 真空除气法 .....	300
10.3.3 吸气的过程 .....	274	11.5.5 其他除气方法 .....	301
10.3.4 铜合金中的气体 .....	275	11.6 脱氧精炼 .....	301
10.4 合金化 .....	276	11.6.1 扩散脱氧 .....	302
10.4.1 合金化原理 .....	276	11.6.2 沉淀脱氧 .....	302
10.4.2 非合金元素的积淀 .....	277	11.6.3 复合脱氧 .....	302
<b>11 铜及铜合金熔炼技术</b> .....	279	11.7 炉前化学成分调整及温度 控制 .....	304
11.1 原料及其制备 .....	279	11.7.1 炉前化学成分调整 .....	304
11.1.1 原料分类 .....	279	11.7.2 炉前温度控制 .....	305
11.1.2 中间合金及其制备 .....	286	11.8 熔炼过程优化 .....	306
11.2 配料 .....	288	11.8.1 提高熔炼速率 .....	306
11.2.1 配料的主要任务 .....	288	11.8.2 变质处理技术 .....	306
11.2.2 配料的基本原则 .....	288	<b>12 铜及铜合金熔炼工艺</b> .....	308
11.2.3 配料比 .....	288	12.1 纯铜的熔炼 .....	308
11.2.4 配料计算 .....	289	12.1.1 普通纯铜的熔炼 .....	308
11.3 熔炼气氛及其选择 .....	291	12.1.2 磷脱氧铜的熔炼 .....	312
11.3.1 “氧化-还原”熔炼 .....	291	12.1.3 无氧铜的熔炼 .....	313
11.3.2 还原性熔炼 .....	291	12.2 黄铜的熔炼 .....	314
11.3.3 敞开式熔炼 .....	292	12.2.1 普通黄铜的熔炼 .....	314

12.2.2 复杂黄铜的熔炼·····	316	14.3.1 液面的人工控制·····	367
12.3 青铜的熔炼·····	320	14.3.2 液面的自动控制·····	368
12.3.1 锡青铜的熔炼·····	320	14.4 铸锭的凝固·····	369
12.3.2 铝青铜和硅青铜的熔炼·····	321	14.4.1 冷却与热的交换·····	369
12.3.3 其他青铜的熔炼·····	323	14.4.2 凝壳和液穴·····	369
12.4 白铜的熔炼·····	324	14.4.3 凝壳和液穴的工艺因素·····	371
12.4.1 白铜的熔炼特性·····	324	14.5 凝固过程中气体的析出·····	374
12.4.2 白铜的熔炼工艺·····	324	14.5.1 气体的析出·····	374
<b>13 铜合金熔炼设备及炉衬技术·····</b>	<b>326</b>	14.5.2 气泡的形成·····	374
13.1 工频有铁心感应电炉·····	326	14.5.3 气泡的上浮·····	374
13.1.1 工作原理·····	326	14.5.4 气孔的形成·····	374
13.1.2 感应体技术·····	327	14.6 结晶及结晶组织·····	375
13.1.3 感应体炉衬技术·····	331	14.6.1 结晶·····	375
13.1.4 上炉体炉衬技术·····	335	14.6.2 结晶组织和晶粒细化·····	377
13.1.5 温度控制及出铜方式·····	336	14.7 收缩、铸造应力与裂纹·····	381
13.2 无铁心感应电炉·····	337	14.7.1 凝固收缩·····	381
13.2.1 工作原理·····	337	14.7.2 铸造应力·····	382
13.2.2 设备组成·····	338	14.7.3 热裂·····	384
13.2.3 短线圈浇注和保温炉·····	340	14.7.4 冷裂·····	387
13.2.4 炉衬技术·····	340	<b>15 铜合金半连续及连续铸造技术·····</b>	<b>388</b>
13.2.5 炉衬损坏预警和拆炉技术·····	342	15.1 直接水冷铸造·····	388
13.3 真空感应电炉·····	344	15.1.1 结晶器一次冷却·····	388
13.3.1 真空感应电炉装置·····	344	15.1.2 二次直接冷却·····	389
13.3.2 真空感应电炉炉衬技术·····	347	15.1.3 其他冷却方式·····	390
13.4 电渣重熔炉·····	348	15.1.4 铸锭的凝固与结晶·····	392
13.5 反射炉·····	350	15.2 非直接水冷铸造·····	392
13.5.1 反射炉的结构·····	350	15.2.1 非直接水冷铸造装置·····	392
13.5.2 耐火材料砌筑与烘烤·····	354	15.2.2 铸锭的凝固与结晶·····	394
13.6 竖式炉·····	356	15.3 振动铸造与间歇铸造·····	395
13.6.1 竖式炉的构造·····	356	15.3.1 结晶器垂直振动·····	395
13.6.2 燃烧系统·····	356	15.3.2 结晶器水平振动·····	396
13.6.3 竖式炉的炉衬技术·····	357	15.3.3 结晶器自然振动·····	397
<b>14 铜合金铸造性质及铸造原理·····</b>	<b>359</b>	15.3.4 间歇铸造·····	398
14.1 熔体的浇注·····	359	15.4 热顶及热模铸造·····	399
14.1.1 流动性·····	359	15.4.1 热顶铸造·····	399
14.1.2 熔体的浇注与分流·····	362	15.4.2 热模铸造(定向铸造)·····	401
14.2 熔体保护与铸锭润滑·····	364	15.5 电磁铸造·····	403
14.2.1 炭黑保护与润滑·····	364	15.5.1 电磁力成型铸造原理·····	403
14.2.2 气体保护和油润滑·····	366	15.5.2 电磁铸造的应用·····	404
14.3 结晶器内金属液面的控制·····	367	15.6 棒坯和管坯水平连续铸造·····	406



15.6.1 棒坯水平连续铸造·····	406	17.2.2 大型立式连续铸造机组·····	447
15.6.2 管坯水平连续铸造·····	408	17.3 水平连续铸造设备·····	448
15.7 带坯的水平连续铸造·····	409	17.3.1 棒坯及管坯水平连铸机列·····	448
15.7.1 保温炉设计·····	410	17.3.2 铜带坯水平连铸机列·····	450
15.7.2 结晶器技术·····	411	17.4 结晶器及其振动和间歇铸造	
15.7.3 带坯引拉技术·····	414	装置·····	452
15.8 立式连续铸造·····	416	17.4.1 结晶器装置·····	452
15.8.1 小型铸锭立式连铸·····	416	17.4.2 振动铸造装置·····	462
15.8.2 大型铸锭立式连铸·····	416	17.4.3 间歇铸造装置·····	463
16 铜合金半连续与连续铸造生产·····	418	17.5 铸锭加工设备及运输工具·····	464
16.1 纯铜铸锭生产·····	418	17.5.1 铸锭锯切设备·····	464
16.1.1 普通纯铜铸锭生产·····	418	17.5.2 铸锭表面加工设备·····	467
16.1.2 磷脱氧铜铸锭生产·····	419	17.5.3 铸锭吊运工具·····	468
16.1.3 无氧铜铸锭生产·····	421	18 铜及铜合金铁模和水冷模铸造·····	471
16.2 黄铜铸锭生产·····	422	18.1 铁模和水冷模铸造技术·····	471
16.2.1 普通黄铜铸锭生产·····	422	18.1.1 浇注温度·····	471
16.2.2 复杂黄铜铸锭生产·····	423	18.1.2 浇注速度·····	471
16.3 青铜铸锭生产·····	426	18.1.3 铸模温度·····	472
16.3.1 锡青铜铸锭生产·····	426	18.2 铸模涂料及其制备·····	472
16.3.2 铝青铜铸锭生产·····	427	18.2.1 涂料的分类及组成·····	472
16.3.3 硅青铜铸锭生产·····	428	18.2.2 涂料作用原理·····	472
16.3.4 其他青铜铸锭生产·····	429	18.2.3 涂料制备及应用·····	473
16.4 白铜铸锭生产·····	432	18.3 铸铁模及水冷模·····	474
16.4.1 普通白铜铸锭生产·····	432	18.3.1 铸模结构·····	474
16.4.2 复杂白铜铸锭生产·····	433	18.3.2 铸模材料·····	475
16.5 铸锭质量及缺陷分析·····	434	18.3.3 铸模设计·····	475
16.5.1 化学成分废品·····	434	18.4 铁模和水冷模铸造工艺·····	477
16.5.2 表面质量缺陷·····	434	18.4.1 平模铸造·····	477
16.5.3 内部质量缺陷·····	436	18.4.2 立模铸造·····	478
16.5.4 偏析缺陷·····	439	18.4.3 倾斜模铸造·····	480
17 铜合金铸造设备及工具·····	441	18.4.4 无流铸造·····	480
17.1 立式半连续铸造设备·····	441	18.5 真空吸铸·····	481
17.1.1 丝杠传动式半连续铸		19 铜线坯连铸技术·····	483
造机·····	441	19.1 上引式连铸·····	483
17.1.2 钢丝绳传动式半连续铸		19.1.1 上引式连铸原理·····	483
造机·····	443	19.1.2 上引式连铸装置及其应用·····	483
17.1.3 液压传动式半连续铸		19.2 轮带式连铸·····	485
造机·····	444	19.2.1 轮带式连铸原理·····	485
17.2 立式连续铸造设备·····	446	19.2.2 轮带式连铸装置及其应用·····	486
17.2.1 小型立式连续铸造机组·····	446	19.3 钢带式连铸·····	487