

“十一五”国家重点图书出版规划项目

Cu

中国有色金属丛书

中国有色金属工业协会组织编写

铜及铜合金 熔炼与铸造

娄花芬 黄亚飞 马可定 编著

Nonferrous Metals



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



“十一五”国家重点图书出版规划项目



铜及铜合金熔炼与铸造

中国有色金属工业协会组织编写

娄花芬 黄亚飞 马可定 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

铜及铜合金熔炼与铸造/娄花芬,黄亚飞,马可定编著.
—长沙:中南大学出版社,2010.12
ISBN 978-7-5487-0206-1

I. 铜... II. ①娄...②黄...③马... III. ①铜—熔炼
②铜合金—熔炼③铜—铸造④铜合金—铸造 IV. TG379

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 025979 号

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 国防科大印刷厂

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 12 ☐字数 295 千字

☐版 次 2010 年 12 月第 1 版 ☐2010 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0206-1

☐定 价 46.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换



主任:

康 义

中国有色金属工业协会

常务副主任:

黄伯云

中南大学

副主任:

熊维平

中国铝业公司

罗 涛

中国有色矿业集团有限公司

李福利

中国五矿集团公司

李贻煌

江西铜业集团公司

杨志强

金川集团有限公司

韦江宏

铜陵有色金属集团控股有限公司

何仁春

湖南有色金属控股集团有限公司

董 英

云南冶金集团总公司

孙永贵

西部矿业股份有限公司

余德辉

中国电力投资集团公司

屠海令

北京有色金属研究总院

张水鉴

中金岭南有色金属股份有限公司

张学信

信发集团有限公司

宋作文

南山集团有限公司

雷 毅

云南锡业集团有限公司

黄晓平

陕西有色金属控股集团有限公司

王京彬

有色金属矿产地质调查中心

尚福山

中国有色金属工业协会

文献军

中国有色金属工业协会

委员(以姓氏笔划排序):

马世光

中国有色金属工业协会加工工业分会

马宝平

中国有色金属工业协会铝业分会

王再云

中铝山东分公司

王吉位

中国有色金属工业协会再生金属分会

王华俊

中国有色金属工业协会

王向东

中国有色金属工业协会钛锆铪分会

王树琪

中条山有色金属集团有限公司

王海东	中南大学出版社
乐维宁	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
许 健	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
刘同高	厦门钨业集团有限公司
刘良先	中国钨业协会
刘柏禄	赣州有色冶金研究所
刘继军	荏平华信铝业有限公司
李 宁	兰州铝业股份有限公司
李凤轶	西南铝业(集团)有限责任公司
李阳通	柳州华锡集团有限责任公司
李沛兴	白银有色金属股份有限公司
李旺兴	中铝郑州研究院
杨 超	云南铜业(集团)有限公司
杨文浩	甘肃稀土集团有限责任公司
杨安国	河南豫光金铅集团有限责任公司
杨龄益	锡矿山闪星锑业有限责任公司
吴跃武	洛阳有色金属加工设计研究院
吴铸铭	中国有色金属工业协会镁业分会
邱冠周	中南大学
冷正旭	中铝山西分公司
汪汉臣	宝钛集团有限公司
宋玉芳	江西钨业集团有限公司
张 麟	大冶有色金属有限公司
张创奇	宁夏东方有色金属集团有限公司
张洪国	中国有色金属工业协会
张洪恩	河南中孚实业股份有限公司
张培良	山东丛林集团有限公司
陆志方	中国有色工程有限公司
陈成秀	厦门厦顺铝箔有限公司
武建强	中铝广西分公司
周 江	东北轻合金有限责任公司
赵 波	中国有色金属工业协会
赵翠青	中国有色金属工业协会
胡长平	中国有色金属工业协会
钟卫佳	中铝洛阳铜业有限公司
钟晓云	江西稀有稀土金属钨业集团公司
段玉贤	洛阳栾川钼业集团有限责任公司
胥 力	遵义钛厂
黄 河	中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司
黄粮成	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
蒋开喜	北京矿冶研究总院
傅少武	株洲冶炼集团有限责任公司
瞿向东	中铝广西分公司



中国有色金属丛书

NMS

学术委员会

主任:

王淀佐 院士 北京有色金属研究总院

常务副主任:

黄伯云 院士 中南大学

副主任(按姓氏笔划排序):

于润沧	院士	中国有色工程有限公司
古德生	院士	中南大学
左铁镛	院士	北京工业大学
刘业翔	院士	中南大学
孙传尧	院士	北京矿冶研究院
李东英	院士	北京有色金属研究总院
邱定蕃	院士	北京矿冶研究院
何季麟	院士	宁夏东方有色金属集团有限公司
何继善	院士	中南大学
汪旭光	院士	北京矿冶研究院
张文海	院士	南昌有色冶金设计研究院
张国成	院士	北京有色金属研究总院
陈景	院士	昆明贵金属研究所
金展鹏	院士	中南大学
周廉	院士	西北有色金属研究院
钟掘	院士	中南大学
黄培云	院士	中南大学
曾苏民	院士	西南铝加工厂
戴永年	院士	昆明理工大学

委员(按姓氏笔划排序):

卜长海	厦门厦顺铝箔有限公司
于家华	遵义钛厂
马保平	金堆城钼业集团有限公司
王辉	株洲冶炼集团有限责任公司
王斌	洛阳栾川钼业集团有限责任公司

王林生	赣州有色冶金研究所
尹晓辉	西南铝业(集团)有限责任公司
邓吉牛	西部矿业股份有限公司
吕新宇	东北轻合金有限责任公司
任必军	伊川电力集团
刘江浩	江西铜业集团公司
刘劲波	洛阳有色金属加工设计研究院
刘昌俊	中铝山东分公司
刘侦德	中金岭南有色金属股份有限公司
刘保伟	中铝广西分公司
刘海石	山东南山集团有限公司
刘祥民	中铝股份有限公司
许新强	中条山有色金属集团有限公司
苏家宏	柳州华锡集团有限责任公司
李宏磊	中铝洛阳铜业有限公司
李尚勇	金川集团有限公司
李金鹏	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
李桂生	江西稀有稀土金属钨业集团公司
吴连成	青铜峡铝业集团有限公司
沈南山	云南铜业(集团)公司
张一宪	湖南有色金属控股集团有限公司
张占明	中铝山西分公司
张晓国	河南豫光金铅集团有限责任公司
邵武	铜陵有色金属(集团)公司
苗广礼	甘肃稀土集团有限责任公司
周基校	江西钨业集团有限公司
郑萧	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
赵庆云	中铝郑州研究院
战凯	北京矿冶研究总院
钟景明	宁夏东方有色金属集团有限公司
俞德庆	云南冶金集团总公司
钱文连	厦门钨业集团有限公司
高顺	宝钛集团有限公司
高文翔	云南锡业集团有限责任公司
郭天立	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
梁学民	河南中孚实业股份有限公司
廖明	白银有色金属股份有限公司
翟保金	大冶有色金属有限公司
熊柏青	北京有色金属研究总院
颜学柏	陕西有色金属控股集团有限责任公司
戴云俊	锡矿山闪星锡业有限责任公司
黎云	中铝贵州分公司

总序



有色金属是重要的基础原材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济建设和社会发展等方面发挥了不可或缺的作用。

改革开放以来，特别是新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界最大的有色金属生产国和消费国，产业整体实力显著增强，在国际同行业中的影响力日益提高。主要表现在：总产量和消费量持续快速增长，2008年，十种有色金属总产量2 520万吨，连续七年居世界第一，其中铜产量和消费量分别占世界的20%和24%；电解铝、铅、锌产量和消费量均占世界总量的30%以上。经济效益大幅提高，2008年，规模以上企业实现销售收入预计2.1万亿以上，实现利润预计800亿元以上。产业结构优化升级步伐加快，2005年已全部淘汰了落后的自焙铝电解槽；目前，铜、铅、锌先进冶炼技术产能占总产能的85%以上；铜、铝加工能力有较大改善。自主创新能力显著增强，自主研发的具有自主知识产权的350 kA、400 kA大型预焙电解槽技术处于世界铝工业先进水平，并已输出到国外；高精度内螺纹铜管、高档铝合金建筑型材及时速350 km高速列车用铝材不仅满足了国内需求，已大量出口到发达国家和地区。国内矿山新一轮找矿和境外矿产资源开发取得了突破性进展，现有9大矿区的边部和深部找矿成效显著，一批有实力的大型企业集团在海外资源开发和收购重组境外矿山企业方面迈出了实质性步伐，有效增强了矿产资源的保障能力。

2008年9月份以来，我国有色金属工业受到了国际金融危机的严重冲击，产品价格暴跌，市场需求萎缩，生产增幅大幅回落，企业利润急剧下降，部分行业

已出现亏损。纵观整体形势，我国有色金属工业仍处在重要机遇期，挑战和机遇并存，长期发展向好的趋势没有改变。今后一个时期，我国有色金属工业发展以控制总量、淘汰落后、技术改造、企业重组、充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力为重点，推动产业结构调整和优化升级，促进有色金属工业可持续发展。

实现有色金属工业持续发展，必须依靠科技进步，关键在人才。为了提高劳动者素质，培养一大批高水平的科技创新人才和高技能的技术工人，由中国有色金属工业协会牵头，组织中南大学出版社及有关企业、科研院校数百名有经验的专家学者、工程技术人员，编写了《中国有色金属丛书》。《丛书》内容丰富，专业齐全，科学系统，实用性强，是一套好教材，也可作为企业管理人员和相关专业大学生的参考书。经过编写、编辑、出版人员的艰辛努力，《丛书》即将陆续与广大读者见面。相信它一定会为培养我国有色金属行业高素质人才，提高科技水平，实现产业振兴发挥积极作用。

康莉

2009年3月

前 言

铜及铜合金由于具有优良的导热导电性、良好的加工成形性、耐蚀性等优点,在人类生产、生活的各个领域得到广泛应用,成为除钢铁、铝以外的第三大金属。随着科学技术的发展和人们物质、文化生活水平的日益提高,铜及其合金的应用更加广泛。

作为文明古国,我们的祖先曾对铜的冶炼和铜合金的铸造作出过历史性的贡献——著名的殷商青铜器文化就是世界史上灿烂辉煌的一页。

最近 20 年来,我国铜加工行业得到了突飞猛进的发展,不但铜加工材的产量世界第一,而且开发了许多世界上先进的技术。同样,我国铜及合金的熔炼与铸造技术也有了长足的进步,包括非真空高纯无氧铜熔炼技术、无氧铜带坯水平连铸技术、铜合金上引连铸技术、高温熔体潜流转炉技术、电磁辅助铸造技术等均处于世界领先水平。

熔铸是铜材加工的第一道工序,而铜合金铸锭(坯)的质量对加工材成品的最终质量至关重要。按照现代质量管理的观点,熔铸工序属于“特殊工序”应特殊对待。因此,对熔炼、铸造技术的发展和装备的更新改造、对熔炼与铸造产品质量、工序管理以及对从事熔炼和铸造人才的培养都应当给予高度重视。

本书以实用为宗旨,以从事铜及铜合金熔铸加工企业的专业人员、管理人员为主要对象,以最新的实践和成果为基础,尽可能简约而系统地介绍铜及铜合金熔铸的基本概念、基本原理、基本方法。本书共分 8 章:熔炼过程和原理;铜及铜合金熔炼技术;熔炼设备;铜及铜合金熔炼工艺;铜及铜合金铸造原理;铜及铜合金的铸造方法;铜及铜合金铸锭(坯)生产;熔铸产品的质量控制。本书既可供从事铜加工的技术人员、管理人员阅读,也可供相关专业的师生们作为教学参考使用。

1987 年出版的《重有色金属材料加工手册》第 2 分册和 2007 年出版的《铜加工技术实用手册》中第 10~19 章的内容,是我国几代铜及铜合金熔铸工作者的实

实践经验、研究成果和智慧结晶，浸透着他们的心血和汗水，对我国铜加工事业的发展发挥了重要作用。我们对他们的贡献表示敬意！本书在很大程度上承袭了这两本著作的精华，参阅和引用了许多专家学者的论著和研究成果，并在编写过程中得到部分专家的具体指导和帮助，在此，对他们表示真诚的感谢。

由于编者的学术水平有限，本书难免存在不妥之处，我们诚恳地欢迎专家和读者不吝赐教、批评指正。

编 者

2010年5月

目 录



第1章 熔炼过程和原理	1
1.1 概述	1
1.1.1 熔炼过程	1
1.1.2 金属的形态及其结构	1
1.2 熔炼过程的物理变化	4
1.2.1 铜的熔化	4
1.2.2 金属液温度的均匀性	5
1.2.3 溶解	5
1.2.4 挥发	6
1.2.5 沉降/上浮和吸附	10
1.3 熔炼过程的化学变化	11
1.3.1 氧化	11
1.3.2 还原	19
1.4 熔体中的气体	19
1.4.1 气体的形态	19
1.4.2 熔体吸气及其影响因素	20
1.4.3 气体的溶解度	21
1.5 脱气精炼	23
1.5.1 分压差脱气的热力学分析	23
1.5.2 分压差脱气法的动力学分析	24
1.5.3 脱气精炼的方法	25
1.6 合金化	28
1.6.1 合金化原理	28
1.6.2 非合金元素的积淀	29
第2章 铜及铜合金熔炼技术	30
2.1 备料	30
2.1.1 原料的种类	30
2.1.2 原料的要求与预处理	32

2.2	配料	33
2.2.1	配料的原则、任务和步骤	33
2.2.2	配料	34
2.3	熔炼、熔炼损失与污染	37
2.3.1	装料和熔化顺序	37
2.3.2	熔炼损失与降损途径	38
2.3.3	杂质元素的积累	39
2.4	熔炉准备与处理	40
2.4.1	烤炉	41
2.4.2	清炉	41
2.4.3	洗炉	41
2.5	成分调整与控制	42
2.5.1	补偿	42
2.5.2	冲淡	43
2.5.3	成分控制	44
2.6	精炼、熔炼气氛及熔体保护	45
2.6.1	“氧化-还原”熔炼	45
2.6.2	还原性熔炼	45
2.6.3	敞开式熔炼	46
2.6.4	熔剂保护及精炼	46
2.6.5	真空熔炼和电渣重熔	49
2.7	熔炼方法	50
2.7.1	熔炼方法分类	50
2.7.2	感应炉熔炼	50
2.7.3	反射炉熔炼	51
2.7.4	竖炉熔炼	52
2.7.5	真空炉熔炼	52
第3章	熔炼设备	56
3.1	有铁芯感应炉	56
3.1.1	工作原理	56
3.1.2	结构特点	58
3.1.3	炉衬和筑炉技术	61
3.2	无芯感应炉	67
3.2.1	工作原理	67
3.2.2	设备组成和结构	69
3.2.3	炉衬技术	70

3.3 反射炉	71
3.3.1 设备组成与结构	71
3.3.2 砌筑与烘烤	73
3.4 竖炉	73
3.5 电渣炉	74
3.6 真空炉	76
第4章 铜及铜合金熔炼工艺	78
4.1 纯铜熔炼	78
4.1.1 普通纯铜的熔炼	79
4.1.2 磷脱氧铜的熔炼	82
4.1.3 无氧铜的熔炼	82
4.2 黄铜熔炼	83
4.2.1 普通黄铜的熔炼	83
4.2.2 复杂黄铜的熔炼	86
4.3 青铜熔炼	91
4.3.1 锡青铜的熔炼	91
4.3.2 铝青铜和硅青铜的熔炼	93
4.3.3 铍青铜的熔炼	96
4.3.4 其他青铜的熔炼	97
4.4 白铜熔炼	98
4.4.1 白铜的熔炼特性	100
4.4.2 白铜的熔炼工艺	100
第5章 铜及铜合金铸造原理	103
5.1 金属液体的流动	103
5.1.1 熔体的流动性	103
5.1.2 金属熔体的流动	104
5.1.3 浇注与分流	108
5.1.4 铸造过程的熔体保护	110
5.2 凝固与结晶	111
5.2.1 凝固与结晶过程	111
5.2.2 冷却与热的交换	115
5.2.3 结晶组织和晶粒细化	120
5.3 凝固过程气体的析出	122
5.3.1 气体的析出过程	122
5.3.2 气孔的形成	122

5.3.3	促进气体析出和减少气孔的方法	123
5.4	收缩与铸造应力	123
5.4.1	收缩与补缩	123
5.4.2	铸造应力	125
5.5	润滑	126
5.5.1	连续或半连续铸造时的润滑	126
5.5.2	铁模铸造时的脱模与润滑	127
第6章	铜及铜合金的铸造方法	128
6.1	铸造方法分类及其特点	128
6.2	立式半连续和连续铸造	131
6.2.1	结晶器结构设计与一次水冷	131
6.2.2	二次水冷	133
6.2.3	液面高度及其控制	134
6.2.4	热顶铸造和热模铸造	135
6.2.5	振动铸造	136
6.2.6	电磁铸造	137
6.2.7	立式半连续铸造工艺参数的选择	138
6.2.8	立式半连续和连续铸造机	139
6.3	水平连续铸造	141
6.3.1	水平连铸的基本方法	141
6.3.2	结晶器结构及与炉子的对接	142
6.3.3	工艺参数的选择	143
6.4	上引连续铸造	145
6.4.1	上引连铸的方法和原理	145
6.4.2	上引连铸结晶器结构	145
6.4.3	铜线杆上引铸造的工艺控制	146
6.5	轮带式 and 钢带式连铸	147
6.5.1	轮带式连铸	147
6.5.2	钢带式连铸	149
6.6	浸渍成形铸造	151
6.6.1	浸渍成形铸造方法和原理	151
6.6.2	浸渍成形铸造装置	152
第7章	铜及铜合金铸锭(坯)生产	153
7.1	纯铜铸锭生产	153
7.1.1	普通纯铜铸锭生产	153

7.1.2 无氧铜铸锭生产	154
7.1.3 磷脱氧铜铸锭生产	155
7.2 黄铜铸锭生产	156
7.2.1 普通黄铜铸锭生产	156
7.2.2 复杂黄铜铸锭生产	157
7.3 青铜铸锭生产	159
7.3.1 锡青铜铸锭的生产	159
7.3.2 铝青铜铸锭的生产	160
7.3.3 硅青铜铸锭的生产	160
7.3.4 其他青铜铸锭的生产	161
7.4 白铜铸锭的生产	162
7.4.1 普通白铜铸锭的生产	162
7.4.2 复杂白铜铸锭的生产	163
第8章 熔铸产品的质量控制	164
8.1 化学成分控制	164
8.1.1 炉前炉后化学成分取样	164
8.1.2 化学成分控制要点	164
8.2 冷隔、流爪及凸瘤	165
8.2.1 冷隔产生的原因	165
8.2.2 控制冷隔的方法	166
8.2.3 流爪与凸瘤	166
8.3 夹杂(渣)	166
8.3.1 夹杂(渣)产生的原因	166
8.3.2 控制夹杂(渣)的方法	167
8.4 疏松和气孔	167
8.4.1 疏松产生的原因及控制方法	167
8.4.2 气孔产生的原因及控制方法	168
8.5 裂纹	169
8.5.1 热裂纹形成的机理和影响因素	169
8.5.2 冷裂的形成及影响因素	171
8.5.3 控制裂纹的方法	172
8.6 偏析	172
8.7 铸锭的全分析	173
8.8 熔铸工艺卡片	174
参考文献	175

第1章 熔炼过程和原理

1.1 概述

1.1.1 熔炼过程

熔炼不同于冶炼。冶炼通常是指从矿石中提炼金属的过程。因此根据原料(矿石)性质的不同,需采取不同的冶金方法:物理方法、化学方法或物理化学方法;火法或湿法等。铜的冶炼过程是将铜精矿在反射炉内通过氧化还原反应炼制成粗铜或直接在闪速炉内精炼成阳极铜,再经电解提纯制得阴极铜,成为可以实用的铜原料。熔炼则是特指将阴极铜、铜旧料等在熔炉内高温熔化、精炼和配制合金的过程。

铜及铜合金熔炼与其他金属的熔炼一样,其目的是为铸造准备合格的金属熔体。因此,其基本的过程也大体相同。

第一步是向烘烤好的炉中按先后顺序加入原料。各组分原料的加料顺序依合金牌号不同而不同。各组分原料的加入量则需根据熔炼炉容量、组元在合金中的成分比例及其在原料中的含量经计算而确定。

第二步是升温加热使原料熔化。在此过程中有4种基本现象:一是被加热的原料表面吸附的气体、水分和某些水合物遇热挥发、蒸发、分解;二是金属原料熔化,由固态变成液态;三是金属及合金元素与炉气或炉衬材料发生化学反应;四是部分组元在液态金属中溶解。

第三步是精炼。精炼的作用和目的是根据熔体性质利用物理的和化学的方法除去有害杂质,或尽可能地减少其含量。物理方法主要有析出、飘浮或沉降、吸附等。化学方法主要是氧化和还原反应。在此过程中会产生大量的烟气和熔渣。

第四步是调整化学成分和静置。在完成第三步精炼后将金属熔体从熔炼炉中转入保温炉(亦称混合炉)或在原炉中静置一段时间后取样作炉前快速分析。然后根据分析结果调整化学成分——冲淡或补料:如果熔体中合金元素含量过高,向炉内投入铜、增加主成分铜的量来冲淡合金元素的含量;如果熔体中合金元素含量不足,则补加合金元素。静置的目的是在保持一定温度的条件下,使熔体静止,以便熔体中的有害气体逸出,使熔渣上浮,也使合金成分通过扩散更加均匀。

第五步是调整温度、准备放流铸造。

1.2.2 金属的形态及其结构

金属与其他物质一样有3种形态:固态、液态和气态。通常使用的是固态金属,熔化后的金属是液态。不同形态的金属具有不同的性能,这取决于它们的组织结构。