

“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 板带生产

娄花芬 编著

Nonferrou

 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



铜及铜合金板带生产

中国有色金属工业协会组织编写

 中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

铜及铜合金板带生产/娄花芬编著. —长沙:中南大学出版社,
2010. 12

ISBN 978-7-5487-0093-7

I. 铜... II. 娄... III. ①铜—板材轧制—生产工艺②铜—带
材轧制—生产工艺③铜合金—板材轧制—生产工艺④铜合金—带材
轧制—生产工艺 IV. TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 168648 号

铜及铜合金板带生产

娄花芬 编著

☐ 责任编辑 田荣璋

☐ 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 长沙瑞和印务有限公司

☐ 开 本 787 × 1092 1/16 ☐ 印张 12.75 ☐ 字数 315 千字

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

☐ 书 号 ISBN 978-7-5487-0093-7

☐ 定 价 48.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换



中国有色金属丛书

NMS 编委会

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
吴锈铭	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
左铁镭	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	金堆城铝业集团有限公司
王辉	株洲冶炼集团有限责任公司
王斌	洛阳栾川铝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	锡矿山闪星锑业有限责任公司
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。

康翔

2009年3月

前 言

铜板带材由于具有多种优良的物理、化学、力学和应用性能而得到越来越广泛的应用，铜板带材加工已经成为国民经济的重要产业。随着科学技术的发展和我国经济实力的提升，铜板带材的消费规模和生产规模迅速扩大，加工技术突飞猛进，产品品种大幅增加，产品品质显著提高。目前，我国业已成为铜板带的消费大国和生产大国，但还远不是铜板带生产的技术强国，在技术上我们与发达国家还有很大的差距。为此，必须不断地引进消化吸收国外的先进技术，不断地自主创新，发展我国的铜板带加工技术。

1979年6月出版的《重有色金属材料加工手册》第3分册——板带材生产，凝聚了老一辈铜加工科技工作者的聪明才智，对我国铜板带工业的发展起了重要作用，惠及几代人。30年过去了，铜板带加工技术发展到了一个新的高度，出现了许多新方法、新设备、新工艺、新材料、新经验。对这些新技术、新成果进行及时总结和介绍显得尤为必要和迫切。2002年，中南大学出版社出版了一本由田荣璋、王祝堂主编的《铜合金及其加工手册》，2007年1月冶金工业出版社出版了一本钟卫佳为主编，马可定、吴维治为副主编的《铜加工技术实用手册》。这些著作总结和介绍了一些新技术、新成果，收到了良好的社会效果，受到了业内人士的欢迎。《手册》几乎涵盖了各种铜及铜合金材料及其加工的方方面面，内容广泛而丰富。但由于《手册》是全集本，无论是结构编排，还是资料取舍都是按全集本统筹考虑的，不可能也不应当按照单行本那样将铜板带生产和管棒材生产分开，一一对应，因此在选材面的拓展及编写深度上都有所限制。本书是有色金属工业协会组织编写的“十一五”国家重点图书出版规划项目《中国有色金丛书》之一种，是为了使专门从事和关心铜板带加工的读者阅读和使用方便，将与铜板带加工相关的基础理论、技术、实践经验，按照铜板带加工的自身特点，自成体系，编纂成的。

本书在编写过程中得到了马可定教授的大力帮助；同时也参考和引用了许多专家、学者的资料，特别是李宝绵教授、朱学北教授、刘敦伟高工等的研究成果

和著作；本书主审田荣璋教授费了不少心血，提出意见和修改，在此一并表示真诚的谢意。

由于编者的学术水平和视野的局限，本书难免存在不妥或错误之处，恳请业内专家学者和读者批评指正。

编 者
2010 年 6 月

目 录



第 1 章 金属轧制基本原理	3
1.1 应力和应力状态	3
1.1.1 外力	3
1.1.2 内力	4
1.1.3 应力	4
1.1.4 应力状态	5
1.1.5 主应力状态图	6
1.1.6 变形区和刚端	7
1.2 金属的塑性变形机构	7
1.2.1 单晶体的塑性变形机构	7
1.2.2 晶体滑移过程的实质	12
1.2.3 多晶体的塑性变形机构	14
1.3 塑性变形过程和规律	17
1.3.1 塑性变形过程	17
1.3.2 体积不变定律	18
1.3.3 最小阻力定律	18
1.3.4 变形不均匀定律	19
1.4 变形程度及变形区参数	20
1.4.1 变形程度	20
1.4.2 变形区参数	21
1.5 轧制时金属的流动与变形	23
1.5.1 高向轧制	23
1.5.2 金属的横向变形——宽展	24
1.5.3 纵向变形	27
1.6 轧制力及力矩的计算	31
1.6.1 轧制力的计算	31
1.6.2 主电动机传动轧辊所需力矩及功率的计算	37
第 2 章 轧制对铜板带组织和性能的影响	44
2.1 热轧、冷轧和温轧的概念	44
2.1.1 热轧	44
2.1.2 冷轧	44

2.1.3 温轧	45
2.2 金属的塑性和变形抗力	45
2.2.1 金属的塑性	45
2.2.2 金属的变形抗力	46
2.3 热轧变形时金属组织和性能的变化	47
2.3.1 热轧变形时金属组织的变化	47
2.3.2 热轧过程中的回复和再结晶	48
2.3.3 热轧对金属性能的影响	49
2.4 冷变形时金属组织和性能的变化	49
2.4.1 冷变形时金属组织的变化	49
2.4.2 冷轧变形时金属性能的变化	50
第3章 轧制技术	52
3.1 厚度控制技术	52
3.1.1 板带材厚度控制原理	52
3.1.2 板带材厚度控制方法	55
3.1.3 板厚自动控制	56
3.2 横向厚差与板形控制技术	59
3.2.1 基本概念	59
3.2.2 辊型及板形控制技术	62
3.3 侧弯与对中控制技术	68
3.3.1 侧弯产生的原因	68
3.3.2 解决侧弯的有效途径	69
3.3.3 对中控制技术	70
第4章 铜板带生产流程	72
4.1 铜及铜合金轧制产品分类	72
4.1.1 轧制产品分类方法	72
4.1.2 铜板带的供应状态	72
4.2 铜及铜合金板带材的生产方法	73
4.2.1 坯料的提供	73
4.2.2 铜及铜合金板带的生产方式	74
4.3 铜及铜合金板带的生产流程	74
4.3.1 生产流程制定的依据和原则	74
4.3.2 生产流程设计中应注意的问题	75
4.3.3 铜及铜合金板带的生产流程	75
第5章 锭坯加热	78
5.1 锭坯准备	78
5.1.1 锭坯的品质要求	78

5.1.2 铸锭尺寸的选择	79
5.2 加热炉的类型及特点	80
5.2.1 推杆式加热炉	80
5.2.2 环形加热炉	81
5.2.3 步进式加热炉	81
5.3 铜及铜合金锭坯的加热制度	83
5.3.1 加热温度	83
5.3.2 供热制度和加热时间	85
5.3.3 炉内气氛控制	85
第6章 热轧	88
6.1 热轧的特点	88
6.1.1 热轧和冷轧比较	88
6.1.2 热轧和水平连铸供坯比较	88
6.2 热轧时的冷却、润滑和辊型	88
6.2.1 热轧时的冷却与润滑	88
6.2.2 热轧辊型与控制	89
6.3 铜及铜合金热轧压下制度	90
6.3.1 热轧总加工率	90
6.3.2 热轧道次加工率设计	91
6.4 热轧机	95
6.4.1 现代热轧机的要求	95
6.4.2 热轧机列的组成和特点	95
6.4.3 热轧机的技术性能	98
6.5 热轧辊	99
6.5.1 热轧辊工作特点和技术要求	99
6.5.2 热轧辊的使用和维护	101
第7章 冷轧	102
7.1 冷轧的特点	102
7.2 冷轧机的结构与性能	102
7.2.1 现代冷轧机的技术要求	102
7.2.2 冷轧机的类型及其特点	103
7.2.3 现代冷轧机的组成与结构	104
7.3 冷轧辊	110
7.3.1 冷轧辊的技术要求	110
7.3.2 冷轧辊的辊径与辊身长度的选择	112
7.3.3 冷轧辊型配置与控制	113
7.3.4 冷轧辊的使用与维护	118

7.4 铜及铜合金的冷轧工艺制度	119
7.4.1 冷轧总加工率	119
7.4.2 道次加工率分配	119
7.4.3 成品道次加工率	122
7.5 冷却与工艺润滑	125
7.5.1 工艺润滑与冷却液的性能要求	125
7.5.2 冷轧用润滑剂	127
7.5.3 冷却与润滑液的使用和维护	128
7.6 卷式轧制时的张力	129
7.6.1 张力的作用 and 选择	129
7.6.2 张力的测量与调整	130
第8章 热处理	132
8.1 热处理方法和特点	132
8.1.1 均匀化退化	132
8.1.2 回复和再结晶退火	133
8.1.3 淬火与时效	139
8.2 铜及铜合金热处理制度	140
8.2.1 退火制度	140
8.2.2 铜合金的淬火-时效制度	144
8.3 铜板带热处理炉	146
8.3.1 钟罩式退火炉	146
8.3.2 气垫式连续牵引退火炉	148
8.3.3 其他退火炉	151
8.3.4 淬火炉	153
第9章 精整	154
9.1 铣面	154
9.1.1 铣面目的	154
9.1.2 铣面的工艺过程	154
9.1.3 铣面机列的组成及技术特性	154
9.1.4 铣削工艺参数选择原则	158
9.1.5 铣刀的结构设计与使用维护	159
9.2 矫平	160
9.2.1 矫平的方法和特点	160
9.2.2 辊式矫平	160
9.2.3 张力矫平	161
9.2.4 拉伸弯曲矫平(拉弯矫平)	162
9.3 清洗与钝化	163
9.3.1 清洗与钝化的作用及工艺要求	163

9.3.2	清洗和钝化剂的特性	164
9.3.3	清洗设备与技术特性	165
9.4	剪切	166
9.4.1	剪切方法和变形特点	166
9.4.2	剪切力的计算	168
9.4.3	板带材的横切	169
9.4.4	带材纵分	177
9.4.5	板带材剪切品质控制	182
第 10 章	板带产品缺陷与控制	183
10.1	尺寸公差	183
10.2	板形缺陷	183
10.3	腐蚀及变色	183
10.4	划伤与擦伤	184
10.5	油迹与水迹	184
10.6	脆裂	184
10.7	起皮	186
10.8	性能不合格	186
	参考文献	188

本书常用符号

1. 轧件尺寸

- H 、 h ——轧件轧前、轧后的厚度/mm;
 $\bar{h}$ ——平均厚度, $\bar{h} = (H + h)/2$ /mm;
 B_H 、 B_h ——轧件轧前、轧后的宽度/mm;
 L_H 、 L_l ——轧件轧前、轧后的长度/mm;
 F_H 、 F_l ——轧件轧前、轧后的断面积/mm²。

2. 变形参数

- Δh ——压下量, $\Delta h = H - h$ /mm;
 ε ——加工率, $\varepsilon = \Delta h/H; \times 100\%$ /%;
 λ ——延伸系数, $\lambda = F_l/F_H \approx L_H/L_h = H/h$;
 Δb ——宽展, $\Delta b = B_h - B_H$ /mm;
 ε_Σ 、 $\varepsilon_{\Sigma平}$ ——总加工率、平均总加工率/%;
 ε 、 $\varepsilon_{平}$ ——道次加工率、平均道次加工率/%;
 $\lambda_{平}$ ——平均延伸系数;
 n ——轧制道次。

3. 轧辊及变形区尺寸

- D 、 R ——轧辊直径、半径/mm;
 L ——轧辊辊身长度/mm;
 D_0 、 R_0 ——支承辊直径、半径/mm;
 L_0 ——支承辊辊身长度/mm;
 D_1 、 d_0 ——工作辊、支承辊辊颈直径/mm;
 a ——轧辊两轴承受力点之间的距离/mm;
 c ——辊身边缘到轴承受力点之间的距离/mm;
 e ——轧件边缘到轴承受力点之间的距离/mm;
 l ——接触弧的水平投影长度, $l \approx \sqrt{R\Delta h}$ /mm;
 l' ——考虑弹性压扁时接触弧的长度/mm;
 F_1 ——接触面水平投影的面积, $F_1 = l\bar{B}$ /mm²;
 f ——辊型凸度(+)或辊型凹度(-)/mm;
 γ ——轧辊弯曲挠度/mm;
 γ_l ——轧辊中部热膨胀凸度/mm;
 S_0 、 S ——空载、轧制时的两轧辊间的辊缝/mm。

4. 常用参数

- α ——咬入角, $\alpha \approx \sqrt{\Delta h/R}$, $\cos\alpha = 1 - \Delta h/D$, 弧度或角度;