



国防科技图书出版基金



精密铜管 铸轧加工技术

■ 张士宏 刘劲松 程明 等著

Cast and Roll Technology of
Precision Copper Tubes



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

精密铜管铸轧加工技术

Cast and Roll Technology of
Precision Copper Tubes

张士宏 刘劲松 程 明 宋鸿武 著
陈 岩 张光亮 李海红 张金利

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

精密铜管连铸连轧加工技术/张士宏等著. —北京:
国防工业出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-118-10229-1

I. ①精… II. ①张… III. ①铜合金—管材轧制—
生产工艺 IV. ①TG335

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 028416 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 15 字数 265 千字

2016 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 66.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授、以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜				
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新		
秘书长	杨崇新				
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳			
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利	
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣	
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力	
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军	
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南	
	傅惠民	魏炳波			

序

进入 21 世纪以来,我国成为世界空调、冰箱生产大国,对热交换用精密铜管的需求迅速增长,促进了精密铜管铸轧技术的快速发展。虽然铜管铸轧生产的原型技术来自于 20 世纪 80 年代的芬兰,但真正使这项技术实现规模产业化应用并引领全球发展的,是中国的有关企业和科研机构。

十几年前,在金龙精密铜管集团的积极努力和中国科学院的大力支持下,中国科学院与金龙精密铜管集团合作共建了中国科学院在企业的第一个工程研究中心——中国科学院精密铜管工程研究中心。此后,本书作者中国科学院金属研究所张士宏研究员及其团队与金龙集团工程技术人员紧密合作,联合国内高校科技力量,展开了长期攻关和系统研究,不但使铜管铸轧这项新技术实现了产业化,还使其实现了全面自主创新,使中国技术成为全球空调、冰箱热交换用精密铜管的主流生产技术,引领了国际精密铜管加工技术的发展,成为我国有色金属加工行业自主创新的典范。目前,中国精密铜管产量达到 100 万 t 以上,不但满足了国内空调制冷行业的大规模需求,还大量出口美国、加拿大、日本和欧洲各国;中国精密铜管企业已在美国和墨西哥建设了生产企业,相信在不远的将来,将会全面走向世界。

铜管铸轧技术是铜管加工行业一项具有革命性的新技术,其核心是铜管坯水平连铸和铜管坯行星旋轧技术。铜管坯水平连铸涉及了合金熔炼技术和水平连铸技术以及相应的水平连铸设备研发;铜管坯行星旋轧技术是在室温下将铸造厚壁铜管坯通过大变形直接生产出大卷重盘管坯,由于摩擦和大塑性变形热效应,旋轧温度达到动态再结晶温度,铸造组织完全转变为细小的变形再结晶组织,使得在后续拉拔加工之前不需进行退火处理,是一种典型的短流程高效生产模式。在后续联合浮动芯头拉拔、内螺纹管材加工成形方面,我国也进行了全面创新,使我国的技术水平一直位居世界前列。在工艺技术创新过程中,我国还实现了全部设备的国产化,形成了具有完全自主知识产权的成套技术与装备。

张士宏团队长期专注于一项新技术的研发,与企业紧密合作,在铜管铸轧领域取得了可喜的成果,不但支持了企业的快速发展,还培养了大量人才,取得了一系列发明专利,发表了几十篇学术论文。研究工作涉及 TP2 铜管合金化熔炼、铜管坯水平连铸及其工艺缺陷控制、铜管三辊行星旋轧、铜管游动芯头拉拔、联合拉拔(包括二联拉、三联拉和四联拉)和盘拉、管材退火、内螺纹滚珠旋压、

铜管件加工成形、毛细管加工、白铜合金管铸轧、水平连铸设备设计与优化、三辊和四辊行星轧机设计优化与模具设计、铜管铸轧生产全过程信息在线采集、专家数据库、质量实时处理系统等一系列基础理论与技术问题,这些工作为促进我国铜管铸轧技术的迅速发展做出了重要贡献。作者将多年来的研究成果和实践经验总结成本书,具有重要意义。期望该书能为材料科学与工程及先进制造领域的科技人员、大专院校学生和研究生提供有益的启示与参考。

谢建新

2016年1月

谢建新,中国工程院院士,北京科技大学教授。

前 言

铜加工业是我国国民经济发展与国防建设的重要支柱产业之一,铜加工材料产量近年来一直以 10%~12% 的速度增长,我国铜加工规模、产量、消费量已连续多年居世界第一,总产量达世界总产量的 1/3 以上。其中,我国制冷用精密铜管的年消耗量达到近 100 万 t。

空调铜管传统生产工艺为“坯料半连铸→穿孔→挤压→酸洗→冷轧→拉拔→炉式退火”(简称挤压工艺),存在工艺流程长、成材率低、能耗大、成本高等缺点。“水平连铸→行星旋轧→盘拉→罩式炉退火”工艺(简称水平连铸—行星旋轧工艺,或铸轧工艺、连铸连轧工艺)和成套装备实现了精密铜管短流程高效生产的技术创新,大幅度提高铜管生产率。铸轧法制造铜管是一种自动化、连续化的高效制造新工艺,它是将连铸管坯通过高速旋轧直接轧出盘管,取代了传统的半连续铸造、加热、卧式挤压、孔型轧制等多道次生产方式。通过十几年的工业化生产,证明用铸轧法生产铜管是一种短流程、节能降耗、低碳和环境友好的生产工艺,有力地促进了我国空调制冷等行业的快速发展。除此之外,铸轧技术正在被开发应用于铝合金管材以及钛合金管材的生产。一旦产业化开发成功,铸轧法也将是铝合金管材生产的一个重要方式。对于钛合金管材生产,目前的挤压技术有相当的难度和缺点,铸轧生产如获成功将大力激发钛合金管材的应用。

铜管铸轧加工先进技术发展速度之快,学科领域交叉之广是过去任何时代所无法比拟的,把握铜管铸轧加工先进技术的现状和发展前景有助于及时研究、推广和应用高新技术,推动铜管加工技术的可持续发展。中国科学院金属研究所塑性加工先进技术研究团队通过精密铜管生产工艺项目的深入研究,掌握了精密铜管铸轧生产工艺流程及其关键技术,建立了铜管铸轧生产线的过程仿真与优化技术及应用设计平台,深刻揭示了铜管铸轧过程中影响质量的各项工艺因素变化规律及产品缺陷的形成机理,获得精密铜管铸轧生产过程中温度产生、变形特征、组织演变及控制方法等大量成果,为提高精密铜管铸轧工艺、模具与设备等设计水平提供理论依据,进而提高产品性能,降低生产成本,获得高品质的精密铜管产品,并通过生产实际应用帮助企业创造出可观的经济效益和社会效益。在前期研究工作基础上,作者决定编写《精密铜管铸轧加工技术》一书。

本书同时也是中国科学院精密铜管工程中心成立十几年来的研究成果结

晶,该成果先后获得中国有色金属工业协会科学技术进步一等奖、国家科学技术进步二等奖。由中国科学院金属研究所与金龙精密铜管集团共建成立的专业研发团队全体成员对这一技术进行了系统研究。金龙精密铜管集团董事会主席李长杰先生对作者的工作进行了长期支持,集团领导王世忠先生、张金利总工程师、研发中心主任程大勇博士参与了大部分研发工作,因此,他们对本书的完成具有不可替代的作用。本书主要由张士宏(第1、2、5、6章)、刘劲松(第3、4章)、程明(第7、8章)编写,张士宏负责全书统稿和定稿,程明负责全书的校对,宋鸿武、陈岩、张光亮、李海红、张金利参与了部分章节的修改。本团队毕业生张光亮博士参与了本书第3、4、5、8章部分内容的编写,李冰博士、肖寒博士、潘进兵硕士分别为第2、3、6章提供帮助。在此一并表示衷心的感谢。

本书重点介绍精密铜管铸轧制备加工技术在现代铜管短流程加工工程中的应用及其相关的技术问题,注重精密铜管铸轧加工先进技术发展的最新动态,具体包括铜管应用及加工制备、铜及铜合金的熔炼与管坯水平连铸、铜及铜合金管坯的行星旋轧、铜及铜合金管材的浮动芯头拉拔、内螺纹铜管旋压成形、外翅片管加工成形、铜管退火、ACR管材加工成形技术、微合金化对制冷铜管力学性能和耐蚀性的影响、铜及铜合金管材铸轧加工专家数据库与信息质量管理体系。全书理论与实践应用并重,在阐述基础理论的同时充分结合生产和工程应用实际,反映最新科技发展成果,培养和拓宽材料加工工程专业的本科生与研究生的科学素养和学术视野,具有较高的学术价值和实际应用价值。

读者通过本书的学习,可以掌握铜管铸轧加工先进技术的最新发展趋势与研究热点,将理论分析与工程实践紧密衔接在一起,有助于我国铜管加工行业对国内外先进加工制造技术的引进、消化与推广应用,提升铜管加工技术水平,增强企业市场竞争能力。

本书适合作为相关铜加工企事业单位工程技术人员技术资料,也可作为高等院校材料科学与工程专业研究生和材料成形与控制工程专业本科高年级学生的学习参考书。

张士宏

2015年12月

目 录

第 1 章 铜管应用及加工制备技术	1
1.1 铜及铜合金的物理性能和加工成形性能	1
1.2 铜及铜合金管材的应用及发展趋势	2
1.2.1 制冷铜管	2
1.2.2 白铜管	4
1.2.3 铜水管	4
1.2.4 特殊铜管	5
1.3 铜管挤压加工等传统生产技术简介	5
1.3.1 铜管挤压加工技术	5
1.3.2 铜管上引连铸法	6
1.3.3 铜管(有缝)焊接生产技术	7
1.4 铜管铸轧技术简介	7
1.5 铜合金管材及其加工技术	9
第 2 章 铜及铜合金的熔铸与管坯水平连铸技术	10
2.1 铜管坯连铸工艺与设备	10
2.1.1 铜管坯连铸工艺	10
2.1.2 铜管坯连铸设备	12
2.2 铜管连铸工艺缺陷及其解决方法	15
2.2.1 铜管连铸工艺缺陷分类	15
2.2.2 铜管连铸工艺缺陷分析	15
2.3 水平连铸铜管坯的微合金化技术	20
2.3.1 铜合金微合金化原理	20
2.3.2 微合金化元素及应用	22
2.3.3 铜管坯的稀土微合金化	26
2.3.4 微合金化铜管坯的水平连铸	31
2.4 本章小结	33

第3章 铜及铜合金管坯的行星旋轧	34
3.1 国外三辊行星轧机的发展及现状	34
3.2 我国三辊行星轧机及其工艺的发展现状与前景	35
3.3 连铸管坯铣面	36
3.4 三辊行星旋轧	37
3.4.1 三辊行星轧机的结构	37
3.4.2 三辊行星旋轧机的特点	39
3.4.3 三辊行星轧机的轧制原理	40
3.4.4 三辊行星轧机的运动分析	40
3.4.5 三辊行星轧机坯料变形特点及轧辊的特点	43
3.4.6 三辊行星旋轧模型的建立及变形规律分析	44
3.4.7 铜及铜合金计算结果对比	52
3.4.8 三辊行星旋轧温度场分布规律	54
3.4.9 铜及铜合金三辊行星旋轧组织演变规律分析	59
3.5 四辊行星轧机	66
3.5.1 四辊行星轧机的结构和工作原理	67
3.5.2 横断面变形过程	68
3.5.3 温度场分布	70
3.6 轧辊模具	71
3.7 工艺缺陷、注意事项	73
3.8 本章小结	75
第4章 铜及铜合金管材的拉拔	76
4.1 铜及铜合金管材拉拔变形工艺	76
4.1.1 空拉工艺	76
4.1.2 固定芯头拉拔工艺	76
4.1.3 游动芯头拉拔工艺	77
4.2 拉拔设备	80
4.2.1 联拉机	82
4.2.2 盘拉机	83
4.3 道次变形及模具配比	84
4.3.1 拉拔的基本概念	84
4.3.2 拉拔工艺参数的确定	85
4.4 模具的润滑失效与典型缺陷分析	89
4.4.1 拉拔模具的失效机理	89

4.4.2	竖道缺陷	90
4.4.3	环沟缺陷	92
4.5	本章小结	92
第5章 内螺纹铜管滚珠旋压加工技术		93
5.1	内螺纹铜管概述	93
5.1.1	内螺纹铜管的应用与发展	93
5.1.2	内螺纹铜管技术标准和产品类型	95
5.1.3	内螺纹铜管成形方法	96
5.1.4	滚珠旋压成形工艺原理和成形设备	99
5.2	工艺分析	101
5.2.1	减径拉拔工艺	101
5.2.2	滚珠旋压工艺	104
5.2.3	内螺纹管空拉工艺	110
5.3	工艺模拟和优化	111
5.3.1	减径拉拔有限元模拟	111
5.3.2	滚珠旋压工艺有限元模拟	119
5.3.3	定径空拉有限元分析	132
5.4	本章小结	134
第6章 铜管退火工艺及微观组织控制		135
6.1	铜管的退火工艺及设备	135
6.1.1	铜管退火工艺	135
6.1.2	铜管退火设备	136
6.1.3	常见缺陷及解决办法	137
6.2	退火过程中的传热	137
6.2.1	传热学基本理论	137
6.2.2	铜盘管退火过程的传热分析	140
6.3	铜盘管温度场的有限元计算	141
6.3.1	初始条件及边界条件	142
6.3.2	对流换热系数和等效热导率	142
6.3.3	铜盘管几何尺寸及退火工艺参数	144
6.3.4	温度场模拟结果及分析	145
6.4	退火过程中的组织演变规律	148
6.4.1	TP2 铜管退火过程中的再结晶与晶粒长大	148
6.4.2	TP2 铜管退火组织演变的有限元计算	149

6.4.3	晶粒尺寸模拟结果	151
6.5	本章小结	153
第7章 ACR 管件成形加工技术		154
7.1	铜管件成形工艺与设备	154
7.1.1	ACR 管弯管成形工艺及设备	154
7.1.2	ACR 管胀管、扩口成形工艺及设备	155
7.1.3	ACR 管折弯成形工艺及设备	156
7.1.4	ACR 管旋压工艺及设备	157
7.2	铜管件常见成形工艺	158
7.2.1	ACR 弯管工艺关键问题	158
7.2.2	ACR 胀管工艺关键问题	160
7.2.3	ACR 管旋压工艺关键问题	162
7.2.4	ACR 管焊接工艺关键问题	164
7.3	铜管件成形常见缺陷	164
7.3.1	ACR 管材弯曲成形缺陷	164
7.3.2	ACR 管材胀管缺陷	165
7.3.3	ACR 管内螺纹成形缺陷	167
7.3.4	ACR 管焊接工艺缺陷	168
7.4	本章小结	169
第8章 铜及铜合金管材铸轧加工专家数据库与质量信息管理 系统		170
8.1	铜管铸轧专家数据库与质量信息管理系统结构与功能	171
8.1.1	系统设计架构	171
8.1.2	数据流程	174
8.1.3	系统功能结构设计	175
8.2	铜管铸轧专家数据库与质量信息管理系统技术实现	178
8.2.1	研究方法	178
8.2.2	知识库	179
8.2.3	推理机	181
8.2.4	优化方法	181
8.2.5	数据库	186
8.3	铜管铸轧专家数据库与质量信息管理系统程序设计	187
8.3.1	水平连铸	188
8.3.2	铣面	190

8.3.3	三辊行星旋轧设计	190
8.3.4	游动芯头拉拔	195
8.3.5	盘拉	203
8.3.6	水平缠绕与退火	203
8.3.7	系统界面设计及分析结果显示	203
8.4	本章小结	211
	参考文献	213

Contents

Chapter 1	Application and processing technology of copper tube	1
1.1	Physical properties and formability of copper and copper alloys	1
1.2	Application and development trend of copper and copper alloy tubes	2
1.2.1	Refrigeration copper tube	2
1.2.2	Copper-nickel alloy tube	4
1.2.3	Copper pipes	4
1.2.4	Special copper tube	5
1.3	Introduction of traditional production techniques such as copper tube extrusion	5
1.3.1	Extrusion technology of copper tube	5
1.3.2	Copper tube manufactured through upward-casting process	6
1.3.3	Copper tube with seam manufactured through welding technology	7
1.4	Introduction of cast and roll technology for copper tube	7
1.5	Copper alloy tube and the related processing technology	9
Chapter 2	Casting and horizontal continuous casting technology of copper and copper alloy tube billet	10
2.1	Continuous casting process of copper tube billet and equipment	10
2.1.1	Continuous casting process of copper tube billet	10
2.1.2	Continuous casting equipment of copper tube billet	12
2.2	Defects and process solution in continuous casting copper tube billet	15
2.2.1	Classification of defects in continuous casting of copper tube	15
2.2.2	Analysis on defect of continuous casting process of copper tube	15

2.3	Micro-alloying technology of horizontal continuous casting of copper tube billet	20
2.3.1	Micro-alloying theory for copper alloy	20
2.3.2	Micro-alloying elements and their applications	22
2.3.3	RE micro-alloying for copper tube billet	26
2.3.4	Horizontal continuous casting of micro-alloying copper tube billet	31
2.4	Summary	33

Chapter 3	Three-roll planetary rolling of copper and copper alloy tube billet	34
3.1	Three-roll planetary rolling mills and development at abroad	34
3.2	Current status and development of three-roll planetary rolling mills and process technology at home	35
3.3	Surface milling of continuous casting copper tube billet	36
3.4	Three-roll planetary rolling	37
3.4.1	Structure of three-roll planetary rolling mills	37
3.4.2	Characteristics of three-roll planetary rolling mills	39
3.4.3	Working principle of three-roll planetary rolling mills	40
3.4.4	Motion analysis of three-roll planetary rolling mills	40
3.4.5	Deformation characteristics of billet through three-roll planetary rolling mills and feature of the rolls	43
3.4.6	Establishment of three-roll planetary rolling model and analysis of the deformation behavior	44
3.4.7	Comparison of calculation results between copper and copper alloy	52
3.4.8	Temperature distribution of three-roll planetary rolling	54
3.4.9	Microstructure evolution of the copper and copper alloy through three-roll planetary rolling	59
3.5	Four-roll planetary rolling mill	66
3.5.1	Structure and working principle of four-roll planetary rolling mill	67
3.5.2	Deformation of billet in cross-section	68
3.5.3	Temperature distribution	70
3.6	Roller and mandrel	71
3.7	Process defect and other matters needing attention	73