



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

# 加热炉

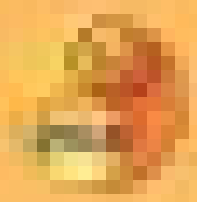
(第4版)

主编 王华

副主编 李本文 饶文涛 王仕博



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press



# 加热的

中国海洋报

2008年12月9日

第10000期



中国海洋报



普通高等教育“十二五”规划教材

# 加 热 炉

(第4版)

主 编 王 华

副主编 李本文 饶文涛 王仕博

北 京

冶金工业出版社

2015

## 内 容 提 要

全书分为基础理论和工艺实践两部分,共11章。基础理论部分,力求说理论证准确,着重其指导性,不追求理论的深度,主要介绍了燃料及燃烧、气体力学、传热原理、金属加热工艺、加热炉的生产率和热效率、加热炉的基本结构等内容。工艺实践部分,尽可能接近我国当前加热炉的实际与技术水平,在介绍工业生产实际中常用的均热炉、连续加热炉、锻造室状炉、热处理炉和电加热炉的基础上,对蓄热式加热炉、真空炉等新型炉型也做了详细介绍;还将富氧燃烧技术、烟气余热回收技术、计算流体力学技术(CFD)在加热炉中的应用等具有前瞻性的新技术作为单独一章重点介绍,力求教材内容与生产实际紧密结合。某些章后还附有习题,利于学生学习。

本书为高等学校材料加工专业教学用书,也可供相关专业的师生、工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

加热炉/王华主编.—4版.—北京:冶金工业出版社,2015.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7029-6

I. ①加… II. ①王… III. ①热处理炉—高等学校—教材  
IV. ①TG155.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第198774号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbcs@cnmp.com.cn

责任编辑 唐晶晶 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7029-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

1983年6月第1版,1996年10月第2版,2007年4月第3版,

2015年9月第4版,2015年9月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;20.5印张;491千字;309页

45.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

## 第4版前言

《加热炉》最初是作为金属压力加工专业的辅助课程被列入原冶金工业部1977年教材工作会议制订的教学出版规划中的，第1版《加热炉》教材由昆明工学院的蔡乔方教授主编，许季光、王治季、邓正蜀等参与编写，东北工学院、北京钢铁学院、西安冶金建筑学院、武汉钢铁学院、马鞍山钢铁学院、江西冶金学院、上海冶金专科学校、重庆大学、河北矿冶学院等有关教师提出了宝贵的意见，于1983年正式出版，作为金属压力加工专业教学用书。在当时，仅限于介绍面向钢铁行业的加热炉的使用情况，供学生掌握加热炉热工知识，了解轧钢和锻压车间各类典型加热炉的特点，能正确选择炉型和加热工艺参数，能分析、判断钢在加热过程中出现缺陷的原因并提出避免缺陷的办法。

随着我国工业的快速发展，钢铁压力加工和有色金属压力加工专业合并为一个专业，已使用了十余年的主要面向钢铁压力加工专业的第1版《加热炉》已不能满足教学要求。昆明工学院的蔡乔方教授等作者对第1版进行了修订，除了根据我国工业发展的实际情况对内容进行适当增删以外，还增加了与有色金属压力加工相关的“电加热炉”一章，于1996年10月出版了《加热炉》第2版。

第2版《加热炉》教材出版后的十余年间，广泛应用于“材料科学与工程”、“材料成形与控制工程”以及其他相关专业的教学，期间我国金属加热与热处理技术的发展以及广大读者对本书的关注，都要求对教材及时改进更新。昆明理工大学蔡乔方教授以及夏家群副教授、姚刚副教授对第2版进行了修订，对已淘汰技术加以删除，对公认比较成熟的新技术、新设备适当吸收，形成第3版《加热炉》，并于2007年4月出版发行。

时至今日，我国金属加热与热处理技术取得了长足的进步，新技术、新设备不断涌现，广大读者也期待着教材的再次更新。昆明理工大学的王华教授、大连理工大学的李本文教授、上海宝钢研究院的饶文涛教授级高工等作为蔡乔方教授培养的研究生，延续师长的学术传承，在总结多年来冶金节能减排领域

研究工作成果的基础上,结合大量实地调研与资料收集工作,对教材再次进行修订。本次修订的主要原则和工作是:

(1) 对全书基本框架结构做了适当调整,全书内容分为11章。耐火材料不再作为单独一章,适当删减后作为炉子结构的一部分并入第6章;蓄热式加热炉并入连续式加热炉一章。

(2) 新增“加热炉相关新技术”作为单独一章,介绍了富氧燃烧技术、烟气余热回收技术等加热炉领域的新技术及相关设备,并介绍了计算流体力学技术(CFD)在加热炉中的应用。

(3) 订正了第3版中一些不当表述和公式错误。

本书由昆明理工大学王华教授担任主编,大连理工大学李本文教授、上海宝钢研究院饶文涛教授级高工和昆明理工大学王仕博博士担任副主编。李本文教授参与了第3、第4和第11章的编写工作,饶文涛教授级高工参与了第6、第7、第9和第11章的编写工作,昆明理工大学姚刚副教授参与了第1和第5章的编写工作,王仕博博士参与了第2、第8和第10章的编写以及全书的校订工作。

由于编者水平所限,书中的错误和疏漏之处诚望读者指正。

编者  
2015年5月

## 第3版前言

本书第2版已历时10年，最初是为轧钢专业编印的教材，现广泛应用于“材料科学与工程”、“材料成形与控制工程”以及相关的专业，高校同行及读者对本书也十分关注。

近10年，我国金属压力加工行业的金属加热与热处理技术有了一定进展，因此对教材也要求及时改进更新。本书的修订原则主要是：

1. 全书的基本架构不作重大改变，篇幅尽可能不动，文字及插图作必要的改动。

2. 根据我国压延行业现有技术水平，对已淘汰的技术加以删除，如老式格子砖蓄热式炉；对公认比较成熟的内容适当吸收，例如近年新兴的高温蓄热式炉技术、连铸机的结晶器等，从基本知识的层面给予适当阐述。

3. 第2版有个别内容阐述不准确或冗余，这次也给予校正。

昆明理工大学的夏家群副教授和姚刚副教授为修订进行了大量调查研究及资料收集工作，并参与了各章节的修订。

希望读者在使用本书后，继续不吝赐教，给予指证，以期在未来的重印和修订时，使之更加完善。

编者

2006年10月

## 第2版前言

本书第1版出版至今已经10余年，作为教材曾在全国冶金院校普遍使用。由于科学技术的发展和教学改革的进展，书中的某些内容需要作相应的改动。本书是根据各校在使用过程中反馈的宝贵意见和建议进行修订的。

这次修订的主要原则是：

1. 全书框架结构基本不动，篇幅作适当压缩。根据近年来我国工业发展的实际，对某些内容进行适当增删；同时根据教学实践的经验，对一些章节作了改写。对第1版中一些不准确的提法和个别错误也作了订正。

2. 由于专业调整，钢铁压力加工与有色金属压力加工合并为一个专业，第1版主要是为钢铁压力加工专业编写的，现在必须兼顾有色金属压力加工的需要，为此在内容上增加了一些与有色金属有关的部分，特别是有色金属加热采用电炉的较多，所以专门增加了“电炉加热”一章（第12章）。各校各专业在使用中可根据自己的专业方向与特点，在讲授时具体掌握取舍。

3. 按规定采用法定计量单位。

4. 一些设备和部件由于还没有国家标准的统一型号，这次修订暂时不动。

参加第2版修订工作的有蔡乔方、王治季、邓正蜀。北京科技大学、中南工业大学和昆明冶金专科学校等校的教师参加了第2版的审稿工作。

希望各校在使用本书后，继续提出宝贵的意见，以便进一步加以完善。

编者

1994年8月



## 第1版前言

“加热炉”是金属压力加工专业的辅助课程，通过本课程的学习，使学生掌握加热炉热工基础知识，了解轧钢和锻压车间各类典型加热炉的特点，能正确选择炉型和加热工艺参数，能分析、判断钢在加热过程中出现缺陷的原因并提出避免缺陷的办法。

本书是根据冶金部1977年教材工作会议制订的教学计划和由北京钢铁学院、东北工学院、中南矿冶学院、西安冶金建筑学院、昆明工学院和重庆大学六院校所拟定的“加热炉”课程教学大纲（草案）编写的，供金属压力加工专业学生使用。本书初稿编成后，1980年在内部印行，有二十余所院校曾经试用。1981年底又召开了部分有关院校参加的审稿会，就试用情况提出了修改意见。根据这些意见对本书内容作了修改。

作为教学用书，本书力求内容简明扼要。全书共分11章，可供60学时使用。各校可根据教学计划的学时安排，选择讲授。

本书单位以国际单位制为主，但鉴于我国正处在向国际单位制过渡的阶段，特别是在有些工厂和设计单位仍采用工程单位制的情况下，本书有些地方也用了工程单位制，或将两种单位并列。

本书由蔡乔方主编，许季光参加了初稿第3章的编写工作，王治季参加了初稿第5章、第7章的编写工作，邓正蜀参加了思考题和习题的编选。全书初稿由东北工学院宁宝林、陈世海主审，鞍山钢铁学院参加了审稿工作。修改时，东北工学院、北京钢铁学院、西安冶金建筑学院、武汉钢铁学院、马鞍山钢铁学院、江西冶金学院、上海冶金专科学校、重庆大学、河北矿冶学院等有关教师提出了宝贵的意见。

由于编者水平有限，因此本书缺点和错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

编者

1982年4月

## 冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
中国冶金百科全书·金属塑性加工	编委会 编	248.00
楔横轧零件成型技术与模拟仿真	胡正寰 等著	48.00
带钢连续热处理炉内热过程数学模型及过程优化	温 治 等著	50.00
冶金热工基础(本科教材)	朱光俊 主编	30.00
冶金过程数值模拟基础(本科教材)	陈建斌 编著	28.00
金属学与热处理(本科教材)	陈惠芬 主编	39.00
金属塑性成形原理(本科教材)	徐 春 主编	28.00
轧制工程学(第2版)(本科教材)	康永林 主编	46.00
材料成形计算机辅助工程(本科教材)	洪慧平 主编	28.00
钢材的控制轧制与控制冷却(第2版)(本科教材)	王有铭 等编	32.00
型钢孔型设计(本科教材)	胡 彬 等编	45.00
轧钢加热炉课程设计实例(本科教材)	陈伟鹏 主编	25.00
轧钢厂设计原理(本科教材)	阳 辉 主编	46.00
材料成形实验技术(本科教材)	胡灶福 等编	18.00
金属压力加工原理及工艺实验教程(本科教材)	魏立群 主编	28.00
金属压力加工实习与实训教程(本科教材)	阳 辉 主编	26.00
金属压力加工概论(第3版)(本科教材)	李生智 主编	32.00
热处理车间设计(本科教材)	王 东 编	22.00
冶金设备及自动化(本科教材)	王立萍 主编	29.00
冶金企业环境保护(本科教材)	马红周 等编	23.00
能源与环境(本科教材)	冯俊小 主编	35.00
加热炉(高职高专教材)	戚翠芬 主编	26.00
金属材料及热处理(高职高专教材)	王悦祥 主编	35.00
冷轧带钢生产(高职高专教材)	夏翠莉 主编	41.00
金属热处理生产技术(高职高专规划教材)	张文莉 等编	35.00
金属塑性加工生产技术(高职高专规划教材)	胡 新 等编	32.00
金属材料热加工技术(高职高专教材)	甄丽萍 主编	26.00
轧钢工理论培训教程(职业技能培训教材)	任蜀焱 主编	49.00
加热炉基础知识与操作(职业技能培训教材)	戚翠芬 主编	29.00

# 目 录

绪言 .....	1
<b>1 燃料及燃烧 .....</b>	<b>2</b>
1.1 燃料的一般性质 .....	2
1.1.1 燃料的化学组成 .....	2
1.1.2 燃料组成的表示方法 .....	4
1.1.3 燃料的发热量 .....	6
1.2 加热炉常用燃料 .....	7
1.2.1 煤 .....	8
1.2.2 重油 .....	8
1.2.3 天然气 .....	10
1.2.4 钢铁厂副产煤气 .....	10
1.2.5 液化石油气及液化天然气 .....	12
1.2.6 加热炉用燃料的选择原则 .....	12
1.3 燃烧计算 .....	14
1.3.1 固体燃料和液体燃料完全燃烧的分析计算 .....	15
1.3.2 气体燃料完全燃烧的分析计算 .....	18
1.3.3 燃烧温度的计算 .....	21
1.3.4 空气消耗系数 .....	24
1.4 气体燃料的燃烧 .....	25
1.4.1 气体燃料的燃烧过程 .....	25
1.4.2 有焰燃烧 .....	27
1.4.3 无焰燃烧 .....	30
1.5 液体燃料的燃烧 .....	32
1.5.1 重油的燃烧过程 .....	32
1.5.2 低压油烧嘴 .....	35
1.5.3 高压油烧嘴 .....	36
1.5.4 机械雾化油烧嘴 .....	37
1.6 固体燃料的燃烧 .....	38
1.6.1 块煤的层状燃烧 .....	38
1.6.2 煤粉燃烧 .....	39
习题 .....	40

2 气体力学 .....	42
2.1 气体及其物理性质 .....	42
2.1.1 连续介质的概念 .....	42
2.1.2 密度和重度 .....	42
2.1.3 气体的压缩性和膨胀性 .....	43
2.1.4 气体的黏性 .....	44
2.2 气体静力学基础 .....	46
2.2.1 作用在气体上的力 .....	46
2.2.2 气体平衡微分方程式 .....	46
2.2.3 气体静力学的基本方程式 .....	47
2.2.4 气体静力学基本方程的物理意义 .....	48
2.2.5 两种气体相关时的静力平衡关系 .....	49
2.3 气体动力学基础 .....	50
2.3.1 基本概念 .....	50
2.3.2 连续性方程式 .....	52
2.3.3 理想气体的运动微分方程式 .....	54
2.3.4 理想气体的伯努利方程式 .....	55
2.3.5 黏性气体的运动微分方程式 .....	56
2.3.6 实际流体的伯努利方程式 .....	56
2.3.7 伯努利方程的应用 .....	58
2.4 气体流动时的压头损失 .....	60
2.4.1 流动的两种型态 .....	60
2.4.2 边界层理论 .....	61
2.4.3 摩擦阻力 .....	63
2.4.4 局部阻力 .....	65
2.4.5 管道计算 .....	68
2.5 气体的流出 .....	69
2.5.1 不可压缩气体的流出 .....	69
2.5.2 压缩性气体的流出 .....	71
2.6 射流 .....	74
2.6.1 自由射流 .....	74
2.6.2 射流的相互作用 .....	76
2.6.3 限制射流 .....	76
2.6.4 炉内的气体流动 .....	77
2.7 烟囱与风机 .....	78
2.7.1 烟囱 .....	78
2.7.2 离心式通风机 .....	82
习题 .....	86

<b>3 传热原理</b> .....	90
<b>3.1 传导传热</b> .....	90
3.1.1 基本概念和定律 .....	91
3.1.2 导热问题控制方程及定解条件 .....	92
3.1.3 几种典型的一维导热问题 .....	94
3.1.4 二维稳态导热的有限差分法 .....	97
<b>3.2 对流换热</b> .....	99
3.2.1 牛顿冷却定律以及对流换热的研究方法 .....	99
3.2.2 对流换热问题的控制方程与定解条件 .....	101
3.2.3 相似原理简介及其在对流换热分析中的应用 .....	102
3.2.4 对流换热的实验公式 .....	106
<b>3.3 辐射换热</b> .....	108
3.3.1 热辐射的基本概念 .....	108
3.3.2 热辐射的基本定律 .....	110
3.3.3 物体表面间的辐射换热 .....	113
3.3.4 气体辐射 .....	118
<b>3.4 综合传热</b> .....	122
3.4.1 综合传热过程的分析和计算 .....	122
3.4.2 火焰炉炉膛内的热交换 .....	125
<b>3.5 非稳态导热</b> .....	128
3.5.1 分析法 .....	128
3.5.2 第一类边界条件下的加热 .....	129
3.5.3 第二类边界条件下的加热 .....	133
3.5.4 第三类边界条件下的加热 .....	134
3.5.5 数值解法 .....	137
<b>习题</b> .....	140
<b>4 金属加热及冷却工艺</b> .....	143
<b>4.1 金属的物理和力学性能</b> .....	143
4.1.1 金属的导热系数 .....	143
4.1.2 金属的比热 .....	145
4.1.3 金属的密度 .....	145
4.1.4 导温系数 .....	145
4.1.5 金属的力学性能及其与温度的关系 .....	146
<b>4.2 金属的加热缺陷</b> .....	147
4.2.1 钢的氧化 .....	147
4.2.2 有色金属的氧化 .....	152
4.2.3 钢的脱碳 .....	152

4.2.4	钢的过热 .....	154
4.2.5	钢的过烧 .....	154
4.3	金属的加热温度和加热速度 .....	154
4.3.1	金属的加热温度 .....	154
4.3.2	金属的加热速度 .....	159
4.4	金属的加热制度和加热时间 .....	160
4.4.1	金属的加热制度 .....	160
4.4.2	金属的加热时间 .....	162
4.5	金属的冷却 .....	164
4.6	连续铸钢过程的传热 .....	165
4.6.1	钢液的一维凝固 .....	165
4.6.2	结晶器中的传热 .....	166
4.6.3	结晶器的热流密度 .....	167
4.6.4	结晶器数值模拟 .....	168
<b>5</b>	<b>加热炉的生产率和热效率 .....</b>	<b>170</b>
5.1	加热炉的生产率 .....	170
5.1.1	炉子的生产率 .....	170
5.1.2	影响炉子生产率的因素 .....	171
5.2	炉膛热交换的分析 .....	174
5.2.1	炉膛辐射热交换的分析 .....	175
5.2.2	炉膛内对流换热的分析 .....	177
5.3	炉子热平衡 .....	177
5.3.1	热量的收入 .....	178
5.3.2	热量的支出 .....	178
5.3.3	热平衡方程和热平衡表 .....	180
5.4	加热炉的燃耗和热效率 .....	181
5.4.1	单位燃料消耗量 .....	181
5.4.2	炉子的热效率 .....	182
5.4.3	提高炉子热效率降低燃耗的途径 .....	183
<b>6</b>	<b>加热炉的基本结构 .....</b>	<b>185</b>
6.1	炉膛和钢结构 .....	185
6.1.1	炉墙 .....	185
6.1.2	炉顶 .....	185
6.1.3	炉底 .....	186
6.1.4	基础 .....	188
6.1.5	炉子的钢结构 .....	189
6.2	加热炉的冷却系统 .....	189

6.2.1	炉底水冷结构 .....	189
6.2.2	汽化冷却 .....	191
6.3	余热利用设备 .....	192
6.3.1	换热器 .....	194
6.3.2	蓄热室 .....	199
6.3.3	余热锅炉 .....	200
6.4	耐火材料 .....	201
6.4.1	耐火材料的性能及分类 .....	201
6.4.2	耐火材料性能 .....	202
6.4.3	加热炉常用耐火砖 .....	203
6.4.4	不定形耐火材料 .....	205
6.4.5	耐火纤维 .....	208
6.4.6	耐火材料的选用原则 .....	209
7	连续加热炉 .....	210
7.1	推送式连续加热炉 .....	210
7.1.1	两段式连续加热炉 .....	210
7.1.2	三段式连续加热炉 .....	211
7.1.3	多点供热的连续加热炉 .....	217
7.1.4	加热圆形料坯的斜底炉 .....	217
7.2	机械化炉底加热炉 .....	218
7.2.1	步进式加热炉 .....	218
7.2.2	转底式环形加热炉 .....	221
7.2.3	链式加热炉 .....	223
7.2.4	辊底式加热炉 .....	224
7.2.5	氧燃加热炉 .....	224
7.3	蓄热式加热炉 .....	226
7.3.1	高温空气燃烧技术概念及设计 .....	226
7.3.2	工业用高效蓄热式加热炉 .....	233
7.3.3	高效蓄热式加热炉的发展及前景 .....	238
7.3.4	高效蓄热式加热炉的应用及效果 .....	238
8	锻造室状炉 .....	240
8.1	加热中小型料坯的室状炉 .....	240
8.2	加热大型锭的室状炉 .....	243
9	热处理炉 .....	245
9.1	热处理炉的分类和特点 .....	245
9.1.1	热处理加热设备的分类 .....	245

9.1.2 热处理炉的特点 .....	245
9.2 轧钢厂常见的热处理炉 .....	247
9.2.1 中厚钢板热处理炉 .....	247
9.2.2 冷轧薄板热处理炉 .....	247
9.2.3 钢管热处理炉 .....	251
9.2.4 线材热处理炉 .....	252
9.3 热处理炉技术发展趋势 .....	253
<b>10 电加热炉</b> .....	<b>254</b>
10.1 电阻加热炉 .....	254
10.1.1 直接加热电阻炉 .....	254
10.1.2 间接加热电阻炉 .....	255
10.1.3 电热体的寿命与表面负荷 .....	258
10.1.4 间接电阻炉的节能措施 .....	258
10.1.5 电阻炉功率的确定与电热元件的计算 .....	259
10.2 感应加热炉 .....	261
10.2.1 感应加热炉工作原理 .....	261
10.2.2 感应加热炉的电热效率 .....	262
10.2.3 金属的感应加热过程 .....	263
10.2.4 炉型结构 .....	264
10.3 盐浴炉 .....	265
10.4 真空热处理炉 .....	266
10.4.1 真空热处理工艺的原理 .....	266
10.4.2 我国真空热处理炉发展概况 .....	267
10.4.3 真空热处理炉的基本类型 .....	268
10.4.4 外热式真空炉 .....	268
10.4.5 内热式真空炉 .....	270
<b>11 加热炉相关新技术</b> .....	<b>272</b>
11.1 氧燃技术 (FLOX 技术, Flameless Oxy-Fuel Combustion) .....	272
11.1.1 氧燃技术简介 .....	272
11.1.2 氧燃技术的主要方式及特点 .....	273
11.1.3 氧燃技术的工业应用 .....	275
11.2 燃烧优化控制技术 .....	276
11.2.1 燃烧优化控制技术的原理 .....	276
11.2.2 ROMT 技术应用案例 .....	278
11.3 加热炉烟气余热回收技术 .....	279
11.3.1 烟气余热发电的原理 .....	280
11.3.2 烟气余热发电的效益 .....	280



11.4 少(无)氧化加热技术 .....	280
11.4.1 无氧化加热的原理 .....	281
11.4.2 无氧化加热关键技术 .....	282
11.5 热电材料工业废热发电技术 .....	282
11.6 多孔介质燃烧 .....	286
11.6.1 多孔介质特性及其作用 .....	286
11.6.2 超绝热燃烧原理与多孔介质燃烧 .....	287
11.6.3 多孔介质燃烧器的发展现状和趋势 .....	288
11.7 CFD 在加热炉中的应用 .....	289
11.7.1 CFD 的发展历史和应用介绍 .....	289
11.7.2 数值计算的要素和步骤 .....	290
11.7.3 数值计算举例 .....	290
11.7.4 加热炉数值模拟 .....	295
附录 .....	301
参考文献 .....	309