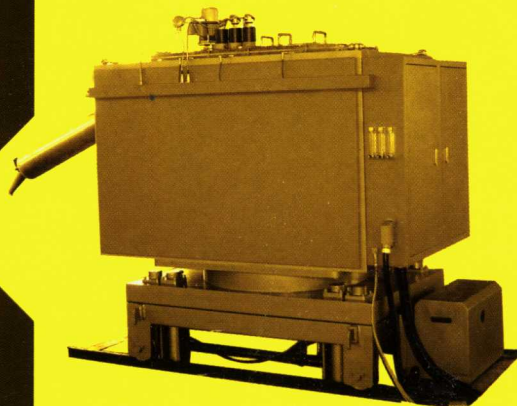


有 色 金 属 加 工 丛 书

有色金属

◆ 锭坯生产技术 ◆

马宏声 编著



化学工业出版社

有色金属加工丛书

有色金属 锭坯生产技术

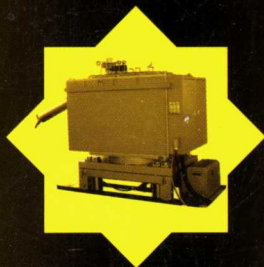
YOUSE JINSHU
DINGPI SHENGCHAN JISHU

有色金属挤压与拉拔技术

有色金属轧制技术

有色金属锻造与冲压技术

有色金属热处理技术

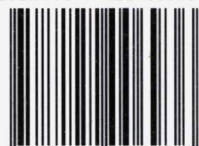


www.cip.com.cn

冶金工业出版社 上海出版

销售分类建议：冶金/金属加工

ISBN 978-7-122-00693-6



9 787122 006936 >

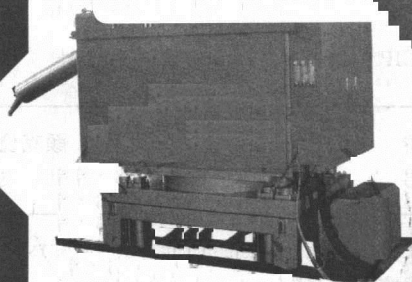
定价：38.00元

有 色 金 属 加 工

有色金属

· 锭坯生产技术 ·

马宏声 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

有色金属锭坯生产历来是有色金属加工的关键环节。本书汇集作者多年从事有色金属科研、教学和生产中的大量经验和科研成果,详细介绍了铝、镁、铜、锌、铅等多种有色金属熔炼与铸锭的原理、方法、设备和工艺,提供了大量具体、翔实的工艺参数,对高效、低耗、优质、高产地进行有色金属锭坯生产将大有裨益。

本书适合从事有色金属熔炼和锭坯生产的技术人员使用。也可供相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

有色金属锭坯生产技术/马宏声编著. —北京:化学工业出版社, 2007.7

(有色金属加工丛书)

ISBN 978-7-122-00693-6

I. 有… II. 马… III. 有色金属-金属加工 IV. TG146

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 096688 号

责任编辑: 邢 涛

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 凌亚男

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张 16 字数 431 千字

2007 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519680) 售后服务: 010-64519661

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

丛书序

我国有色金属加工产业发展迅速，据有关部门提供的统计资料，目前铜加工材与铝加工材产量居世界首位。由于有色金属材料具有优异的性能，在航空、航天、电子、信息、能源、交通、冶金、电力、机械及建筑等领域得到了广泛应用。因此，可控制材料形状、尺寸、组织与性能有色金属加工技术，引起了人们广泛的关注。有色金属加工技术的发展与进步，对有色金属新材料的研究开发、应用及产业化具有决定性的作用，同时可有效地改善与提高传统材料的生产与使用性能，对国民经济的发展有重要的作用。

为了满足当今有色金属加工技术开发与生产的需要，我们编写了本套丛书。力图把有色金属锭坯制备、加工成形到材料热处理等全面系统地做一个总结。本丛书汇集了国内外有色金属材料加工工程领域的专家、学者及工程技术人员等在有色金属材料加工方面所取得的重要研究成果，以及作者自身多年教学与科研工作中积累的经验，使读者系统地了解有色金属加工理论、工艺及设备等方面的知识，对有色金属加工工作者提高业务水平大有帮助。

考虑到有色金属加工企业中，不论是重金属、轻金属，还是稀有金属材料的加工，产品生产工序都是从加工坯料制备开始，经轧制、挤压、拉拔、锻造及冲压等加工成形工艺到材料热处理结束。所以，我们将本丛书划分为五个分册，分别是《有色金属锭坯生产技术》、《有色金属挤压与拉拔技术》、《有色金属轧制技术》、《有色金属锻造与冲压技术》及《有色金属热处理技术》，共约 200 万字，各分册既具有各自独立的体系，又相互关联，便于读者使用。

本丛书内容系统新颖，从基本理论入手，展开技术性叙述，尽力体现系统性、先进性、科学性及实践性，可供有色金属加工企业与科研院所的工程技术人员，以及高等院校从事有色金属加工教学和科研的教师与材料加工成型专业的学生参考。

“有色金属加工丛书”系列丛书在撰写过程中，得到东北大学和郑州大学有关领导及老师的支持，在此一并表示感谢。

温景林

2007.05

前 言

能源、信息技术和材料被称为当代文明的三大支柱。有色金属和黑色金属共同构成现代金属材料体系。有色金属及其合金与能源及信息技术的关系十分密切，是国民经济、人们日常生活及国防工业、科学技术发展必不可少的基础材料和重要的战略物资。按资料统计，世界上铜、铝、镁、铅、锌、锡、金、银等八种有色金属的产量虽仅为钢产量的 5.4%，但其产值则达到钢产值的 50% 以上。近些年来，我国有色金属材料生产得到了飞跃发展，主要有色金属（铜、铝、镁）产量已跃居世界第一，成为名副其实的有色金属生产大国。

有色金属锭坯生产历来是有色金属加工生产的关键环节，对压力加工材料的质量有直接的影响，而且许多工艺因素变化大，不易控制。随着生产的发展，人们越来越清醒地认识到熔铸环节的重要性。生产实践已经证明，新材料的开发研制与熔铸手段的发展相辅相成，相互促进，没有先进的、科学的熔铸工艺，就不可能研究开发出所需的新材料。

我国由有色金属生产大国进一步发展成有色金属生产强国，在生产中必须不断地采用先进的科学技术，才能高效、低耗、优质、高产地进行有色金属材料生产，来满足日益增长的对高、新有色金属材料的需求。为此必须有一大批具有一定理论基础、掌握现代科学技术的技术人员，活跃在科研、生产第一线。为了新一代从事有色金属材料研究和生产的技术人才及现有技术人员知识更新的需要，我根据几十年来从事有色金属科研、教学和生产的一些经验，并汇集相关的资料编写成此书，供从事有色金属材料生产的工程技术人员和科研人员以及相关专业师学习参考。以此为有色金属材料

生产的发展,贡献我一点微薄之力。

本书共分7章。第1章是冶金物理化学及合金组织结构的基础知识。第2~3章是有色金属及合金熔炼的基本原理、方法、设备和工艺。分析影响熔体质量的各种因素,讨论气体、夹杂物的形成及去除、防止措施及检测方法。介绍国内外各种熔体炉外连续净化处理新技术、新工艺、新装置的特点、适用范围及效果。第4~7章主要内容是有色金属及合金锭坯形成的理论基础、工艺方法及设备。讨论影响熔体凝固过程的各种因素,分析铸锭结晶组织、偏析、裂纹等缺陷形成条件及控制方法。以翔实的材料介绍晶粒细化技术的理论及应用实践,详尽介绍新开发的各种连续铸锭技术,尤其是高效节能的连续铸轧、连续铸挤等新的成形方法。

限于作者水平,书中疏漏及不当之处,请同行专家学者与读者斧正。

编者

2007年5月

目 录

1	有色金属合金化原理	1
1.1	冶金物理化学基础	1
1.1.1	液态金属的结构	1
1.1.2	液态金属的性质	5
1.1.3	金属熔炼过程中的传热	13
1.1.4	金属熔炼过程中的传质	16
1.1.5	金属的蒸发	19
1.1.6	金属氧化的热力学条件	22
1.1.7	金属氧化的动力学条件	26
1.1.8	金属与炉气的作用	34
1.1.9	熔体与炉衬的作用	44
1.2	合金组织结构的基本知识	46
1.2.1	合金中的相	46
1.2.2	合金成分及合金相结构对性能的影响	52
2	有色金属熔炼	60
2.1	有色金属中的气体	60
2.1.1	气体在金属中的存在形式	60
2.1.2	气体的溶解度	64
2.1.3	熔体的吸气过程	70
2.1.4	气体在金属内的扩散	71
2.1.5	气眼、气孔的形成	74

2.1.6	金属熔体中气体的检测方法	81
2.2	有色金属中的夹杂	89
2.2.1	夹杂的种类和形态	89
2.2.2	夹杂的来源及危害	91
2.2.3	液态金属中气体与非金属夹杂的相互作用	93
2.2.4	熔体中非金属夹杂物的检测方法	95
2.3	熔炼过程中合金化学成分的控制	97
2.3.1	炉料组成与配比	97
2.3.2	炉料选择的原则	105
2.3.3	合金配料计算	106
2.3.4	化学成分调整	110
2.4	铝合金熔炼	114
2.4.1	铝合金熔体净化	114
2.4.2	铝合金熔体的炉内净化处理	124
2.4.3	铝合金熔体炉外连续净化处理	148
2.4.4	铝合金熔体净化综述	158
2.4.5	铝合金熔炼工艺要点	165
2.4.6	铝合金熔炼炉	172
2.5	铜合金熔炼	176
2.5.1	纯铜的氧化除气	176
2.5.2	利用氧化除去纯铜中的杂质元素	178
2.5.3	脱氧	179
2.5.4	纯铜熔炼的工艺要点	184
2.5.5	黄铜的熔炼	185
2.5.6	青铜的熔炼	187
2.5.7	白铜的熔炼	190
2.5.8	铜合金熔炼炉	191
2.6	镁合金熔炼	201
2.6.1	镁合金熔炼的工艺特点	201
2.6.2	镁合金熔体的保护	202

2.6.3 镁合金熔体净化	208
---------------------	-----

3 真空熔炼 212

3.1 真空熔炼技术的发展	212
3.2 真空熔炼的理论基础	213
3.2.1 真空熔炼热力学	214
3.2.2 真空熔炼动力学	219
3.3 真空感应熔炼	222
3.4 真空电弧炉熔炼	223
3.4.1 电弧的形成及构造	224
3.4.2 磁场对电弧的影响	226
3.4.3 稳弧线圈的搅拌作用	227
3.4.4 真空电弧炉	227
3.4.5 真空自耗电弧炉熔炼过程	229
3.4.6 真空自耗电弧熔炼的冶金效果	231
3.5 电子束炉熔炼	233
3.5.1 电子束炉熔炼的特点	234
3.5.2 电子束炉和电子枪的结构及工作方式	235
3.6 等离子炉熔炼	239
3.6.1 等离子枪及工作原理	239
3.6.2 等离子炉的类型	242

4 锭坯形成的理论基础 249

4.1 熔体的凝固过程	249
4.1.1 纯金属的凝固	251
4.1.2 单相合金的凝固	257
4.2 凝固过程的传热	275

4.2.1	金属凝固过程的传热	275
4.2.2	金属凝固过程的传热特点	275
4.2.3	铸锭的温度场	276
4.2.4	凝固过程热交换的基本微分方程	280
4.2.5	水冷模中凝固时的热交换	281
4.2.6	连续铸锭凝固时的热交换	285
4.3	熔体流动对凝固过程的影响	286
4.3.1	熔体的对流	286
4.3.2	熔体流动对凝固过程的影响	291
4.4	电磁场对凝固过程的影响	292
4.4.1	交、直流磁场对合金凝固过程的影响	293
4.4.2	电流对金属凝固组织的影响	295

5 铸锭组织形成及控制 297

5.1	铸锭典型的宏观组织	297
5.1.1	激冷晶区的形成	298
5.1.2	柱状晶区的形成	299
5.1.3	等轴晶区的形成	300
5.2	铸态组织对性能的影响	304
5.2.1	正常组织对铸锭性能的影响	304
5.2.2	异常组织对铸锭性能的影响	305
5.3	铸锭宏观组织的控制	314
5.3.1	合理的浇注工艺	315
5.3.2	冷却条件的控制	316
5.3.3	孕育处理	317
5.3.4	动力学细化	320
5.3.5	铝合金晶粒细化	323
5.3.6	铜合金晶粒细化	335
5.3.7	镁合金晶粒细化	338

6 有色金属锭坯成形方法和设备 344

6.1 锭坯生产方法分类	344
6.1.1 锭坯生产方法分类	344
6.1.2 锭坯的质量要求	345
6.2 锭模铸锭	346
6.2.1 平模铸锭	347
6.2.2 立模铸锭	348
6.2.3 无流铸锭	349
6.3 半连续铸锭	350
6.3.1 半连续铸锭的特点	350
6.3.2 连续铸锭过程中的热交换	352
6.3.3 结晶器内的凝固壳和液穴	353
6.3.4 半连续铸锭的成型工具——结晶器	364
6.3.5 立式半连续铸造机	372
6.3.6 热顶铸锭	375
6.3.7 DC 铸锭工艺	378
6.4 电磁铸锭	389
6.4.1 电磁结晶器的构造及工作原理	390
6.4.2 EMC 铸锭的质量分析	393
6.4.3 CREM 和 LFEMC 铸造法	396
6.5 连续铸锭	398
6.5.1 水平连续铸锭	398
6.5.2 立弯式带坯连续铸造	408
6.5.3 线坯水平连续拉铸	408
6.5.4 浸渍成形	411
6.5.5 上铸法	413
6.6 连铸连轧	416
6.6.1 Properzi 连铸机	416

6.6.2	SCR 连铸机	418
6.6.3	Secor 连铸机	419
6.6.4	双带式连铸机	421
6.7	连续铸轧	422
6.7.1	概述	422
6.7.2	双辊铸轧的基本原理	428
6.7.3	双辊铸轧主要工艺参数	442
6.7.4	双辊连续铸轧设备及工具	446
6.7.5	双辊板带铸轧生产质量控制	452
6.7.6	高速铸轧机	454
6.8	连续铸挤	456
6.8.1	概述	456
6.8.2	连续铸挤机的设备结构	457
6.8.3	铸挤基本原理与工艺	459
6.8.4	连续铸挤技术的应用	462

7 铸锭缺陷 464

7.1	偏析	464
7.1.1	微观偏析	464
7.1.2	宏观偏析	466
7.2	缩孔与疏松	471
7.2.1	金属的凝固收缩	471
7.2.2	缩孔与疏松的形成	474
7.3	裂纹	477
7.3.1	裂纹的种类	477
7.3.2	铸造应力	478
7.3.3	热裂纹	480
7.3.4	冷裂纹	488
7.3.5	防止裂纹的办法	488

7.4 冷隔	490
7.4.1 冷隔的形成	490
7.4.2 防止冷隔的方法	491
参考文献	493

1 有色金属合金化原理

1.1 冶金物理化学基础

现代科学技术领域，研究液态金属及合金的性质，尤其是研究它们的热力学和动力学性质，是冶金化学的主要课题；同时，研究液态金属及合金的结构和性质，也是金属物理和液体物理的基本课题。多数金属及合金材料都是在熔融状态下，经过许多处理工序后生产出来的，因此，为了获得高性能的金属材料，就必须对液态金属及合金的结构和性能有所了解。

1.1.1 液态金属的结构

液态金属的结构是指金属中组成质点的排列状态和运动方式，它取决于原子间交互作用能的特性及数值，它直接影响其物理化学性质。理想气体是完全无序的结构，理想固体（晶体）是完全有序的结构，而液体则是介于固体和气体之间的一种中间状态的结构。温度对物质结构的影响很大：低温下，接近于固体的结构，而在接近临界点（沸点）温度时，则接近于气体的结构，但在一般熔炼温度下的金属熔体则是准晶态的结构。这一点从下面两个物理量可以得到说明：首先，当固体变成气体时，其体积无限膨胀；而金属熔化变成液体时，其比容仅增加 3%~5%，即原子间的平均间距仅增加 1%~1.5%，这说明了原子间仍有很强的结合力，原子的分布仍具有一定的规律性；其次，金属的熔化潜热一般只是金属汽化热的 3%~7%，即熔化时原子的结合能仅减少了百分之几。可见金属熔化后在不太高的过热温度下，其结构类似固态，只是原子的

热运动更为剧烈；但是，原子的有序分布仅限于邻近原子的周围，形成大小不等的有序排列的原子集团，称为“近程有序”。原子集团内保持接近于晶体的结构，在这种原子集团的周围是原子混乱排列的无序带，但它们之间没有明显的分界面，所以不能视为两个相。金属熔体就是由这种无数的原子集团群所构成，这种集团群是不稳定的，它会瞬间出现，也可能瞬间消失。这样，此起彼伏、瞬息万变就构成液态金属结构的动态图像。

在熔炼温度下，液体金属结构具有以下特点。

(1) 原子间仍保持较强的结合能，因此原子的排列在较小距离内具有一定规律性，且其平均原子间距增加不大。

(2) 因液态金属排列的规律性仅保持在较小的范围，约为十几个到几百个原子组成的集团。固体是许多晶粒组成的，液体是由许多原子集团组成，而原子集团之间的结合则受到很大破坏。

(3) 由于液体中原子热运动的能量较大，能量起伏也大，每个原子集团内具有较大动能的原子，则能克服邻近原子的束缚，除了在集团内产生很强的热运动（产生空位及扩散等）外，还能成簇地脱离本原子集团而加入到别的原子集团，或组成新的原子集团。因此所有原子集团都处于瞬息万变的运动状态，犹如在不停顿地游动。

(4) 原子集团之间距离较大，比较松散，犹如存在“空穴”。既然原子集团是在“游动”，同样，“空穴”也在不停地“游动”。这种“游动”不是原有的集团和原有的“空穴”在液体中各处移动，而是此处的原子集团和“空穴”在消失的同时，在另一处又形成新的原子集团和“空穴”。“空穴”的存在使液体中公有电子的运动产生变化。在原子集团内，原子间的结合靠金属键，一些自由电子归此原子集团中所有原子公有，故仍具金属导电的特征。在原子集团间，自由电子难以自己飞越“空穴”，只能伴随着集团间原子的交换而跟着正离子一同运动，在某种意义上说，“空穴”间的导电具有离子导电的特征。所以大部分金属在熔化时，电阻率会突然