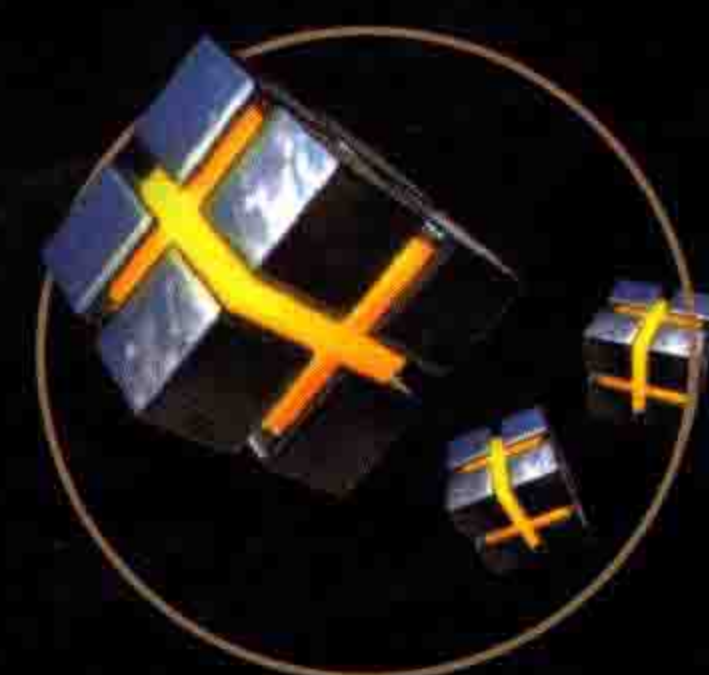


TONG JI TONGHEJIN
YELIAN JIAGONG YU YINGYONG



铜及铜合金

冶炼、加工与应用

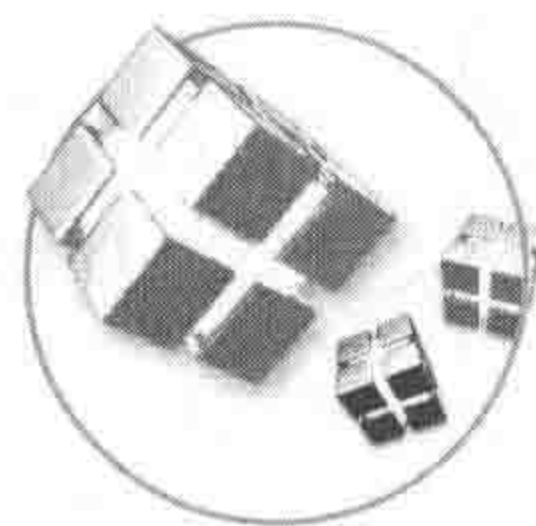
张 毅 陈小红 田保红 等著



化学工业出版社

TONG JI TONGHEJIN
YELIAN JIAGONG YU YINGYONG

铜及铜合金



冶炼、加工与应用

张 毅 陈小红 田保红 等著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书系统介绍了铜及铜合金冶炼、加工与应用的基础原理及工程技术。本书共十七章，主要内容包括铜及铜合金的冶炼与铸造、铜合金的加工技术、铜合金的热处理、铜合金的耐蚀性、铜及铜合金的表面处理、铜合金的焊接、铜合金的评价试验与测定方法、铜及铜合金的再利用、铜合金导电材料、电子工业用铜合金材料、热交换器铜合金材料、建筑用铜合金材料、切削成形用铜合金材料、铜合金功能材料、铜合金粉末冶金材料、铜及铜合金铸件等。并结合作者的有关研究成果对引线框架铜合金、铜基复合材料、弥散强化铜、电接触用铜合金等近年来发展较快的高性能电子铜合金进行了介绍。

本书适合材料、机械、冶金、汽车、化工、电子、电力等领域中相关科研人员和工程技术人员参考，也可作为铜合金加工行业技术人员、高等院校材料科学与工程及相关专业研究生或高年级本科生教材和参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

铜及铜合金冶炼、加工与应用/张毅等著. —北京:
化学工业出版社, 2017.1

ISBN 978-7-122-28505-8

I. ①铜… II. ①张… III. ①炼铜②铜合金-重金属
冶金 IV. ①TF811

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 274244 号

责任编辑: 邢 涛
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 余纪军
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: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市瞰发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 28½ 字数 745 千字 2017 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

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: 128.00 元

版权所有 违者必究



前言

人类使用铜及铜合金已有数千年历史。我国使用铜的历史年代更久远,大约在六、七千年以前我们的祖先就发现并开始使用铜。早在夏代,我国就开始了铜合金的冶炼,后历经夏、商、西周、春秋及战国早期,延续时间约一千六百余年,形成了我国著名的青铜器文化。到西汉、北宋和明清时期都有文献典籍对铜合金的冶炼和加工技术进行详细的记载,从而为世界人类文明的发展做出了不可磨灭的贡献。新中国成立后,我国国民经济迅速发展,特别是改革开放以来,对高端铜合金的需求越来越高,诸如电子铜合金、海洋防腐蚀用铜合金、航空航天用铜合金和建筑材料用铜合金等领域。本书对铜合金的冶炼以及加工技术做了系统的介绍,同时结合作者研究开发的新型铜合金材料及其加工技术进行了介绍。

本书由张毅、陈小红、田保红、国秀花、游龙、李丽华、刘勇、刘平和高直撰写。其中,第10章和第14章由河南科技大学张毅副教授撰写,第7章、第8章、第9章、第12章和第13章由上海理工大学陈小红高级工程师撰写,第4章由河南科技大学田保红教授撰写,第3章和第16章由国秀花博士撰写,第1章、第2章和第17章由游龙博士撰写,第5章由李丽华博士撰写,第6章和第15章由刘勇教授撰写,第11章由张毅副教授和北京机电研究所高直工程师撰写。柴哲绘制了本书部分图表。全书由张毅副教授、田保红和刘勇教授负责统稿,刘平教授负责审稿。

河南科技大学宋克兴教授、黄金亮教授、任凤章教授、贾淑果教授、李炎教授、李红霞高级工程师等也参与了部分研究工作,洛阳理工学院安俊超博士、轴研科技股份有限公司高元安和王智勇高级工程师在本书的撰写过程中提出了许多宝贵的意见。河南科技大学材料科学与工程学院硕士研究生柴哲、孙慧丽、许倩倩、李瑞卿、田卡、朱顺新、杨志强和李艳等和部分金属材料工程专业本科生也参与了部分实验工作。在此向上述人员表示衷心的感谢。

本书的有关项目研究得到国家自然科学基金(项目编号:51101052;51605146)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(项目编号:2006AA03Z528)、河南省高等学校青年骨干教师资助计划(项目编号:2012GGJS-073)、河南省重点攻关项目(项目编号:152102210074)、河南省重点攻关项目(国际科技合作)(项目编号:162102410022)、河南省杰出青年科学基金项目(项目编号:0512002700)、河南省教育厅自然科学研究资助项目(项目编号:2011QN48)、河南省教育厅自然科学研究资助项目(项目编号:14B430015)、河南省教育厅自然科学研究资助项目(项目编号:15A430006)和河南科技大学青年学术带

头人启动基金（项目编号：13490001）等项目的资助。

本书的出版得到河南科技大学、有色金属共性技术河南省协同创新中心、河南省有色金属材料科学与加工技术重点实验室、上海理工大学和化学工业出版社大力支持。

本书在撰写过程中参考和引用了一些单位和著作权人的文献资料、研究成果和图片等，已在参考文献中尽力列出，在此谨致谢意。

由于我们水平有限，书中难免有不足和疏漏之处，恳请读者不吝批评指正。

著者
2016 年 8 月
于河南科技大学

▶ 目 录

▶ 第 1 章 原材料1

1.1 铜矿石和铜精矿	1
1.1.1 铜的矿物及矿床	1
1.1.2 铜储量	2
1.1.3 铜矿石的选矿	3
1.1.4 铜精矿	4
1.2 铜的冶炼方法	4
1.2.1 概述	4
1.2.2 铜冶炼的种类	5
1.2.3 干法冶炼	5
1.2.4 湿法冶炼	6
1.3 铜的电解精炼	11
1.4 铜合金原料	15
参考文献	16

▶ 第 2 章 熔化和铸造17

2.1 熔化	17
2.1.1 熔化方法和熔炼炉	17
2.1.2 熔体处理	24
2.2 铸造	27
2.2.1 凝固现象和组织	27
2.2.2 铸造法	30
2.2.3 连铸连轧	36
2.3 铸锭热处理	38
2.3.1 概述	38
2.3.2 铸锭二次加热	38
2.3.3 均匀化处理	39
参考文献	40

▶ 第 3 章 加工42

3.1 塑性加工基础	42
------------------	----

3.1.1	塑性变形机制	42
3.1.2	塑性变形及其影响因素	46
3.1.3	加工过程中的组织变化	57
3.1.4	塑性加工力学	62
3.1.5	塑性加工方法及分类	70
3.2	塑性加工技术	71
3.2.1	板和带的加工	71
3.2.2	管和棒的加工	78
3.2.3	线材的加工	85
3.2.4	特殊加工	86
3.2.5	二次加工	89
	参考文献	91

第4章 热处理

93

4.1	热处理基础	93
4.1.1	回复与再结晶	93
4.1.2	影响回复与再结晶的因素	99
4.1.3	常用材料的退火组织及其控制	102
4.1.4	时效处理	109
4.2	热处理技术	126
4.2.1	热处理方法和热处理炉	126
4.2.2	酸洗与表面清理	132
	参考文献	134

第5章 耐蚀性

136

5.1	腐蚀基础	136
5.1.1	耐腐特性	136
5.1.2	电化学特性	137
5.2	使用环境和材料腐蚀	139
5.2.1	铜及铜基合金的耐腐蚀性	139
5.2.2	淡水中铜管的腐蚀	141
5.2.3	大气中铜及铜合金的腐蚀	143
5.2.4	海水中铜合金的腐蚀	144
5.2.5	应力腐蚀开裂	147
5.3	腐蚀防护技术	149
5.3.1	电流防腐蚀	149
5.3.2	缓蚀剂	154
5.3.3	涂装	158
	参考文献	159

6.1 预处理	161
6.1.1 概述	161
6.1.2 机械预处理	161
6.1.3 化学和电化学预处理	167
6.2 化学处理	170
6.2.1 化学转化膜处理	170
6.2.2 化学着色处理	172
6.3 镀覆	176
6.3.1 电镀	176
6.3.2 化学镀	182
6.3.3 气相沉积	185
6.4 浸蚀	190
6.4.1 概述	190
6.4.2 化学浸蚀	191
参考文献	192

7.1 概述	194
7.1.1 焊接技术的发展	195
7.1.2 国内焊接技术的发展现状	196
7.2 熔化焊	197
7.2.1 焊接性	198
7.2.2 焊接方法	198
7.2.3 焊接材料	202
7.2.4 实例	205
7.3 钎焊和钎焊剂	206
7.3.1 硬钎焊	208
7.3.2 软钎焊	209
7.4 其他联接	210
7.4.1 扩散联接	210
7.4.2 压接	211
7.4.3 特殊联接	214
参考文献	216

8.1 概论	218
--------------	-----

8.1.1	铜合金的大气腐蚀	218
8.1.2	海洋环境腐蚀	218
8.1.3	应力腐蚀	219
8.1.4	脱成分腐蚀	220
8.2	评价试验	221
8.2.1	脱锌腐蚀试验	221
8.2.2	应力松弛试验	222
8.2.3	应力腐蚀开裂试验	223
8.2.4	钎焊性试验	225
8.2.5	镀层性能试验	226
8.2.6	热交换器用铜合金管的残余应力试验	227
8.3	测定方法	228
8.3.1	极化特性测试方法	228
8.3.2	膜厚测定方法	229
	参考文献	230

第9章 废铜利用

232

9.1	铜的再生和利用概述	232
9.1.1	发展循环经济与有色金属	232
9.1.2	再生铜工业现状和存在的问题	233
9.1.3	再生铜工业发展趋势	235
9.2	铜废料的直接回收利用	236
9.2.1	用铜合金废料直接生产铜合金	237
9.2.2	用紫杂铜连铸连轧生产低氧光亮铜杆	237
9.3	废杂铜的火法冶炼	239
9.3.1	废杂铜的火法熔炼	239
9.3.2	废杂铜熔炼常用熔炼炉及工艺	241
9.3.3	再生粗铜的火法精炼	241
9.3.4	再生铜阳极的电解精炼	242
9.4	废杂铜的湿法冶炼	242
	参考文献	243

第10章 导电材料

245

10.1	概述	245
10.2	电力用铜系材料	246
10.2.1	纯铜类材料	246
10.2.2	铜合金材料	248
10.2.3	仪表用铜合金材料	256
10.3	电极材料	257

10.3.1	电阻焊用电极材料	259
10.3.2	放电加工用电极材料	263
10.4	超导电铜材料	264
10.4.1	超导材料概述	264
10.4.2	超导电线的稳定化	267
10.4.3	稳定化态铜在极低温度下的特性	269
	参考文献	269

第 11 章 电子工业用材料

272

11.1	电子管用材料	272
11.1.1	电子管用无氧铜	272
11.1.2	电子管用无氧铜的其他用途	274
11.2	半导体封装用材料	274
11.2.1	引线框架材料	275
11.2.2	引线框架用铜材料	276
11.2.3	引线框架用铜合金热变形行为	281
11.3	机械零件用材料	298
11.3.1	弹簧材料	298
11.3.2	触点材料	299
11.4	电路材料	310
11.4.1	铜箔	310
11.4.2	铜印刷电路	313
11.5	使用环境和失效	315
11.5.1	电子器件的使用环境	315
11.5.2	环境因素与失效现象	315
11.5.3	室内环境	316
11.5.4	大气腐蚀	316
11.5.5	硫化物蠕变	317
11.5.6	迁移	318
11.5.7	微动	318
11.5.8	扩散	320
11.5.9	应力腐蚀开裂	321
	参考文献	321

第 12 章 热交换器材料

324

12.1	冷冻空调用铜管	324
12.1.1	腐蚀类型	325
12.1.2	高性能传热管	326
12.2	汽车散热器材料	327

12.2.1 腐蚀类型与控制方法	327
12.2.2 材料	328
12.3 工业用热交换器材料	328
参考文献	330

第 13 章 建筑用材料

331

13.1 建筑给水用铜管	331
13.1.1 特征	331
13.1.2 使用注意要点	332
13.2 屋顶用铜板	336
13.2.1 特征	336
13.2.2 着色铜板	336
参考文献	337

第 14 章 切削成形用材料

338

14.1 切削用铜合金	338
14.1.1 概述	338
14.1.2 易切削黄铜的成分和组织	339
14.1.3 易切削性能	340
14.2 锻造用铜合金	341
14.2.1 锻造和锻造机械的种类	341
14.2.2 锻造的加热方式	342
14.2.3 加热锻造用润滑剂	345
14.2.4 锻造常见缺陷	346
14.3 拉深用材料	347
14.3.1 拉深用铜合金	347
14.3.2 拉深加工力学	347
14.3.3 拉深工艺性与金属学的关系	349
14.3.4 特殊拉深加工	351
14.4 货币用材料	352
14.4.1 货币用材料的种类	352
14.4.2 货币用材料的加工	353
参考文献	357

第 15 章 特殊功能材料

359

15.1 形状记忆合金	359
15.1.1 概述	359

15.1.2	形状记忆合金的力学性能和机理	360
15.1.3	铜系形状记忆合金的种类	363
15.1.4	Cu-Zn-Al 合金的制造工程	364
15.1.5	特性	366
15.1.6	使用方法和应用举例	368
15.2	汽车用耐磨材料	371
15.2.1	概述	371
15.2.2	汽车同步器齿环材料的摩擦与磨损	372
15.2.3	实用合金的种类和特性	374
15.3	连铸结晶器用铜材料	375
15.3.1	概述	375
15.3.2	连续铸造用结晶器的要求和特性	377
15.3.3	实用合金的种类和特性	380
15.4	减振合金	382
15.4.1	减振机理	382
15.4.2	热处理和组织	384
15.4.3	实用合金的种类和特性	386
	参考文献	391

第 16 章 粉末冶金材料

393

16.1	概述	393
16.2	制造技术	396
16.2.1	粉末的制造	396
16.2.2	粉末的性质	403
16.2.3	成形	406
16.2.4	烧结	410
16.3	实用烧结铜合金及其应用实例	415
16.3.1	烧结含油轴承	415
16.3.2	摩擦材料	416
16.3.3	机械零件	417
16.3.4	电器零件	418
16.3.5	铜熔渗零件	418
	参考文献	419

第 17 章 铜及铜合金铸件

421

17.1	铸造方法	421
17.1.1	砂型铸造	421
17.1.2	金属型铸造	422
17.1.3	连续铸造	423

17.1.4	其他铸造方法	427
17.2	熔体性质、凝固特性及铸造缺陷	431
17.2.1	熔体性质	431
17.2.2	熔体流动性	432
17.2.3	补缩效果	433
17.2.4	铸件开裂性	434
17.2.5	耐压性	435
17.3	种类和特征	436
17.3.1	铜铸件	436
17.3.2	青铜铸件	436
17.3.3	磷青铜铸件	438
17.3.4	铅青铜铸件	439
17.3.5	黄铜铸件	440
17.3.6	高强黄铜铸件	441
17.3.7	铝青铜铸件	442
	参考文献	443

第 1 章

原 材 料

1.1 铜矿石和铜精矿

1.1.1 铜的矿物及矿床

自然界发现的含铜矿物有 200 多种，但重要的矿物仅 20 来种。除少见的自然铜外，主要有原生硫化铜矿物和次要的次生氧化铜矿物。常见的有工业价值的铜矿物见表 1-1。

表 1-1 重要的铜矿物

矿物	组成	Cu/%	颜色	晶系	光泽	莫氏硬度	相对密度
斑铜矿	Cu_5FeS_4	63.3	铜红至深黄色	立方	金属	3	5.06~5.08
黄铜矿	CuFeS_2	34.5	黄铜色	正方	金属	3.5~4	4.1~4.3
黝铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	45.8	灰至铁灰色	立方	金属(发亮)	3~4.5	4.6
砷黝铜矿	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	51.6	铅灰至铁黑色	立方	金属	3~4.5	4.37~4.49
辉铜矿	Cu_2S	79.8	铅灰至灰色	斜方	金属	2.5~3	5.5~5.8
铜蓝	CuS	66.4	靛蓝或灰黑色	立方	半金属至树脂状	1.5~2	4.6~4.76
黑铜矿	CuO	79.9	灰黑色	单斜	金属	3.5	5.8~6.4
孔雀石	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	57.3	浅绿色	单斜	金刚至土色	3.5~4	3.9~4.08
蓝铜矿	$2\text{CuCO}_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	55.1	天蓝色	单斜	玻璃状近于金刚	3.5~4	3.77~3.89
水胆矾	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	56.2	绿色	单斜	玻璃状	3.5~4	3.9
氯铜矿	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_4$	59.5	绿色	斜方	金刚至玻璃	3~3.5	3.76~3.78
硅孔雀石	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36.0	绿至蓝色	立方	玻璃至土色	2.4	2.0~2.4
自然铜	Cu	100	铜红色	立方	金属	2.5~3	8.95

全球开发的铜矿类型主要有斑岩型、砂页岩型、黄铁矿型和铜镍硫化物型，分别占世界总储量的 55.5%、29.2%、8.8%和 3.1%。

斑岩型铜矿主要分布在环太平洋、中亚-蒙古和特提斯 3 大成矿带上，特别是美洲大陆西部科迪勒拉-安第斯山沿岸山脉中的斑岩型铜矿最多。主要分布的国家是智利、美国、秘鲁、菲律宾、印度尼西亚、巴布亚新几内亚和加拿大、伊朗、哈萨克斯坦、蒙古等。斑岩铜矿具有规模大、品位低的特点，常易形成大型铜业基地。在世界储量大于 500 万吨的铜矿床

中，斑岩铜矿就有 34 个，占 60.7%，是最重要的铜矿床类型。

砂页岩型铜矿床为沉积岩溶矿的层状矿床，具有规模大、品位高、伴生组分多等特点。产于陆块边缘和内部的裂陷带中，主要见于赞比亚、扎伊尔、俄罗斯、美国、波兰、阿富汗、巴西和澳大利亚等国。

黄铁矿型铜矿床为产于火山岩系中的层状铜矿床，又称为火山成因块状硫化物型铜矿床。这类矿床的规模一般小于斑岩型和砂页岩型，在世界 56 个大于 500 万吨的铜矿床中，该类矿床只占 2 个。但矿床品位高、伴生组分多、开发价值大。铜镍硫化物型主要与基性、超基性侵入杂岩有关，在俄罗斯、美国、加拿大和澳大利亚等铜矿床中占有重要地位。铜储量大于 500 万吨的 56 个矿床中，该类矿床有 3 个，占 53%。

除上述铜矿床类型外，尚有铜-铀型、自然铜型、矽卡岩型和脉型等类型。铜-铀型矿床是 20 世纪 70 年代在澳大利亚南部发现的一种新类型，目前在世界上只发现了一个这类矿床——澳大利亚奥林匹克坝铜铀矿床，该矿床至少有矿石储量 20 亿吨，共有铜金属储量 3200 万吨、平均含铜 1.6%，铀储量 120 万吨、品位 0.06%，金 1200 吨。

在我国，矽卡岩型铜矿占有较大的比例，因此我国铜矿床可分为 5 大类型：斑岩型占总储量 42.1%，矽卡岩型占 22.3%，黄铁矿型占 15.0%，砂页岩型占 11.3%，铜镍硫化物型占 7.3%。我国主要铜矿床类型及典型矿床举例见表 1-2。

表 1-2 我国主要铜矿床类型及典型矿床举例

类型	储量比/%	典型铜矿	主要含铜矿物及伴生组分
斑岩型铜矿	41±	江西德兴铜矿、富家坞，山西中条山铜矿峪，西藏江达玉龙，内蒙古乌奴格吐等	黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、辉铜矿，伴生组分有 Mo、Au、Ag、Co、Se、Te、Re 等 特点：贫，但储量大，伴生组分多
矽卡岩型铜矿	27±	长江中下游地区的许多大中型矿山均属此类，如铜绿山、封山洞、城门山、武山等	黄铜矿居主，亦见斑铜矿、铜蓝、黝铜矿等，Pb、Zn、Mo、Au、Ag、Se、Te、Co 等因矿床不同而略有差异 特点：较富，但规模不及前者
层状型铜矿（包括变质岩层状型和含铜砂页岩型）	11±	云南东川、易门、大姚，湖南车江、麻阳，山西算子沟和内蒙古霍各乞等	以辉铜矿、斑铜矿、孔雀石居主，硅孔雀石及黄铜矿为次，有时见有砷黝铜矿、硫砷铜矿，伴生组分有时有 Co、Ag、Au、Ge 特点：氧化率高，铜的状态及分配较复杂，难选
火山沉积型铜矿	5.5±	甘肃白银，新疆阿舍勒	主要矿物为黄铜矿，亦可见有铜蓝、辉铜矿、斑铜矿、黝铜矿、方铅矿、闪锌矿，伴生元素有 Au、Ag、Cd、Se、Ti、In、Te、Bi 等 特点：多呈大型，品位高
铜镍硫化物型铜矿	6.4±	甘肃金川，吉林盘石，新疆喀拉通克等	主要有价矿物为镍黄铁矿、紫硫镍铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等，有时有黑铜矿，可伴生有铂族元素、Co、Au 等 特点：Cu、Ni 关系密切，只有靠冶金方法分离

1.1.2 铜储量

世界铜矿资源主要分布在北美、拉丁美洲和中非三地，据统计，截至 2008 年，世界已探明的铜储量共 5.5 亿吨，其中智利 1.6 亿吨，中国 0.3 亿吨（约占 5%），储量基础 6300 万吨（表 1-3）。

中国铜资源储量主要分布于西藏、江西、云南、安徽等地。铜查明资源储量最多的三个省（区）为：江西 1282 万吨、云南 1052 万吨、西藏 1148 万吨。

表 1-3 世界铜储量分布

国家名称	铜储量/万吨	占世界储量/%
智利	16000	29.09
秘鲁	6000	10.91
墨西哥	3800	6.91
印度尼西亚	3600	6.55
美国	3500	6.36
中国	3000	5.45
波兰	3000	5.45
澳大利亚	2400	4.36
俄罗斯	2000	3.64
赞比亚	1900	3.45
哈萨克斯坦	1800	3.27
加拿大	1000	1.82
其他	7000	12.73
总计	55000	100

中国铜矿类型较多。主要类型有斑岩型、砂页岩型、黄铁矿型、矽卡岩型和铜镍硫化物型 5 大类，分别占总资源储量的 44.4%、23.5%、11.9%、11.8%和 6.7%。铜矿品位一般较低。如斑岩型铜矿床平均品位一般仅达到 0.5%左右，铜矿品位大于 1%的储量只占总量的 35%左右，平均品位仅 0.87%，远低于智利、赞比亚等国的铜矿石品位。中国初步形成了江西、铜陵、大冶、白银、中条山、云南、东北 7 大铜业基地，目前正在基建的铜矿山有云南新平大红山、江西城门山和富家坞、青海赛什塘、西藏甲玛及新疆阿舍勒。尚未开发的大中型铜矿床主要位于新疆、西藏、青海、内蒙古、黑龙江等地区。

1.1.3 铜矿石的选矿

硫化铜矿经过矿物加工处理后得到精矿。浮选是矿物加工工艺的主要方法，重选、磁选、离析及溶浸等也有应用。当前，铜选矿厂由破碎、筛分、磨矿、分级、选别和脱水等作业组成。由于入选矿石的品位越来越低，难选复合矿、氧化矿比例增加，能源和设备涨价以及环保的限制，选矿成本增加，因此铜选厂必须进行改造和应用节能技术，扩大选矿厂规模，提高选矿自动化水平，增加矿产资源的综合利用程度，充分回收伴生的金、银、铝等有价值金属。

近年来，在硫化铜矿的浮选工艺研究中，低品位、复杂难选硫化铜矿的浮选回收逐渐成为研究重点。邱廷省等以某低品位硫化铜矿石为分选对象，对其开展了系统的铜硫分离试验研究。通过使用高效捕收剂 LP-01，采用分步优先浮选和中矿再磨再选的工艺流程，实现了铜硫的低碱、高效分离，获得了铜品位为 18.43%、回收率为 87.54%的铜精矿，分选指标较为理想；吕子虎等对西藏某低品位铜矿石开展浮选试验研究，采用铜硫“混合浮选—混合精矿再磨—铜硫分离”工艺流程对该矿石进行分选，获得了铜精矿含铜 23.39%、铜回收率 82.17%、硫精矿含硫 36.58%、硫回收率 61.97%的良好技术指标。王世辉以新疆某硫化铜矿石为研究对象，采用铜部分优先、铜锌混浮、再磨再分离新工艺，并将新型捕收剂 ZJ900 用于铜浮选作业中。小型闭路试验获得了良好的技术指标，铜精矿品位和回收率分别达到 21.29%和 89.17%。陈代雄等采用磁选—浮选联合工艺对内蒙古某难选铜铅锌硫化矿石进行试验研究。通过磁选脱除磁黄铁矿，应用优先浮选流程，采用组合抑制剂（Na₂S + ZnSO₄ + Na₂SO₃）和高效捕收剂 BP，可以获得较好的技术指标。为高硫复杂难选铜铅锌硫

化矿石的有效分选提供了一条新途径。

1.1.4 铜精矿

铜精矿由于矿石产地、矿石种类和选矿技术条件的不同，其化学成分和矿物组成是十分复杂的冶炼厂对这些化学成分和矿物组成不作具体规定，仅根据冶炼方法、冶炼工艺特点及冶炼技术的不同，对某些成分加以适当限制，但出于冶炼对精料的要求以及对选冶联合成本的考虑，我国规定了铜精矿的质量标准，见表 1-4。

表 1-4 铜精矿质量标准（YB 112—82）

品级	Cu/%(不小于)	杂质/%(不大于)			
		Pb	As	Zn	MgO
1 级品	30	—		0.3	5
2 级品	29	—		0.3	5
3 级品	28	—		0.3	5
4 级品	27	—		0.3	5
5 级品	26	—		0.3	5
6 级品	25	—		0.3	5
7 级品	24	6	9	0.4	5
8 级品	23	6	9	0.4	5
9 级品	22	6	9	0.4	5
10 级品	21	6	9	0.4	5
11 级品	20	6	9	0.4	5
12 级品	18	7	10	0.5	5
13 级品	16	7	10	0.5	5
14 级品	14	8	10	协议	5
15 级品	12	8	10	协议	5

- 注：1. 表中注有“—”者为该项杂质不限制。
2. 采用电炉熔炼时，精矿含 MgO 不在此限。
3. 精矿水分不超过 14%，在取暖期内不超过 8%。
4. 对精矿中银、硫有价元素，必须报分析数据。

铜矿石和精矿的组成，常常是决定采用何种冶炼工艺的关键因素。在现有技术条件下，硫化铜矿的可选性好，易于富集，经选矿后产出的铜精矿多数采用火法冶炼工艺。氧化铜矿的可选性差，一般难以进行选矿富集，而直接采用湿法工艺生产电积铜。品位较高的以硅酸铜为主的难选氧化铜矿或氧化与硫化混合矿，也有的采用离析法处理后，选出铜精矿再以火法冶炼。

1.2 铜的冶炼方法

1.2.1 概述

近 20 年来，世界铜冶炼技术有很大的发展，火法炼铜仍然是主要的炼铜方法，传统的火法炼铜工艺如鼓风炉、反射炉和电炉炼铜已经被淘汰，被富氧强化熔炼所取代。富氧强化熔炼的基本特点是熔炼强度大、单台炉子的生产能力高、能源消耗低，特别是冶炼烟气含二