

铜合金 及其应用

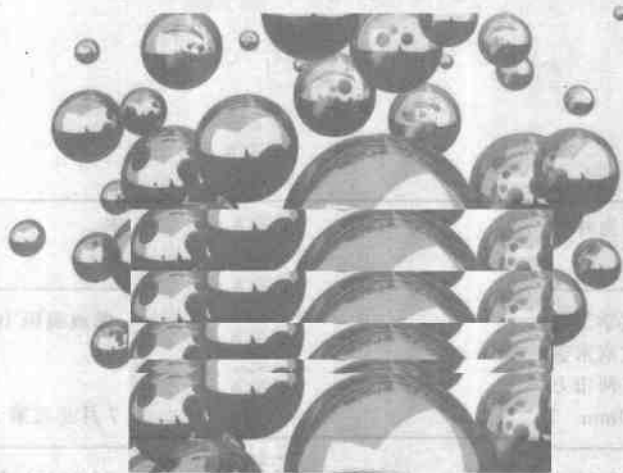
刘平 任凤章 贾淑果 等编著



化学工业出版社

铜合金 及其应用

刘平 任凤章 贾淑果 等编著



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

铜合金及其应用/刘平,任凤章,贾淑果等编著.
北京:化学工业出版社,2007.6
ISBN 978-7-122-00362-1

I. 铜… II. ①刘…②任…③贾… III. 铜合金
IV. TG146.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 059997 号

责任编辑:丁尚林
责任校对:李林

文字编辑:徐雪华
装帧设计:尹琳琳

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:北京永鑫印刷有限责任公司
装订:三河市万龙印装有限公司
720mm×1000mm 1/16 印张26 $\frac{1}{2}$ 字数549千字 2007年7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:48.00 元

版权所有 违者必究

前 言

铜是一种传统而又现代的重要金属材料。在人类使用的所有材料中，铜对人类文明的影响最显著。从人类文明的初期直到今天，铜为人类社会的不断进步作出了重大的贡献。

铜是人类最早认识和使用的金属，也是人类用以制造工具的第一种金属。我国的青铜冶炼始于夏代（约公元前 21 世纪至约公元前 17 世纪）。进入奴隶社会以后，炼铜技术发展很快。所使用的劳动工具、武器、食具、货币、日用品和车马装饰等，都是用青铜制造的，显示出我们祖先精湛的艺术才能。更主要的是青铜材料代表一种新的生产力登上了历史舞台，有力地促进了生产的发展和人类文明的进步，为人类社会的进步作出了不可磨灭的贡献。

随着人类文明的发展，铜及铜合金不断开发出新的用途，成为一个充满生机和活力的现代工程材料。当前人类步入以电气化和电子信息为特征的高度文明的社会，为铜的应用开辟了更为广阔的天地。铜以品种繁多的合金和化合物的形式被人们利用，已经深深地渗入到生产和生活的各个方面，成为人类跨入 21 世纪取得飞速发展一个不可缺少的重要金属。

2002 年，全球的铜消耗量为 1515 万吨，至 2006 年铜消耗量为 1817 万吨，年消耗量增长率近 4.7%。而我国 2002 年的铜消费量达 250 万吨，占全球铜消耗量的 17%，近几年需求量保持了每年超过 9% 的高速增长。我国已取代美国，成为世界第一大铜消费国。不论从世界还是从我国来看，铜的使用量增长势头强劲。

本书对铜合金及其应用，尤其是近年来新开发出来的铜合金材料及其应用进行了系统的介绍。全书由刘平、任凤章、贾淑果、田保红、陈小红、张毅编著。

感谢上海理工大学、河南科技大学在本书编写的过程中所给与的大力支持。

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

刘平

2007 年 4 月

目 录

第 1 章 铜合金概述	1
1.1 铜与人类文明	1
1.2 铜的基本特性	2
1.3 铜矿分布及种类	2
1.3.1 铜矿分布	2
1.3.2 铜矿的种类	3
1.4 铜的冶炼	4
1.4.1 铜的冶炼史	4
1.4.2 铜的冶炼技术	6
1.5 中国铜工业的现状	8
1.5.1 铜的消费	8
1.5.2 铜的冶炼	9
1.5.3 铜的加工	9
1.5.4 铜合金新材料	10
参考文献	12
第 2 章 铜合金相图与相变	13
2.1 概述	13
2.2 铜合金中的相	13
2.2.1 固溶体	14
2.2.2 中间相	15
2.3 铜合金的相图	17
2.3.1 铜合金的二元相图	17
2.3.2 铜合金的三元相图	20
2.4 铜合金中的相变	22
2.4.1 有序无序相变	22
2.4.2 调幅分解	24
2.4.3 时效转变	25

2.4.4 共析转变	27
2.4.5 马氏体相变	27
参考文献	28

第3章 铜合金牌号与性能 29

3.1 铜合金分类	29
3.2 纯铜	30
3.2.1 纯铜的牌号及化学成分	30
3.2.2 杂质及微量合金元素对铜性能的影响	31
3.2.3 纯铜的物理性能	38
3.2.4 纯铜的工艺性能	42
3.2.5 纯铜的力学性能	42
3.2.6 纯铜的化学性能	42
3.2.7 纯铜的基本特性及典型用途	47
3.3 黄铜	47
3.3.1 杂质对黄铜的影响	49
3.3.2 黄铜牌号及化学成分	50
3.3.3 黄铜的物理性能	52
3.3.4 黄铜的工艺性能	54
3.3.5 黄铜的力学性能	56
3.3.6 黄铜的化学性能	73
3.3.7 黄铜的基本特性及主要用途	73
3.4 青铜	73
3.4.1 青铜的中外牌号对照及化学成分	73
3.4.2 锡青铜	73
3.4.3 铝青铜	84
3.4.4 硅青铜	91
3.4.5 锰青铜	97
3.4.6 铬青铜	99
3.4.7 铍青铜	102
3.4.8 镁青铜	108
3.4.9 铁青铜	108
3.4.10 铍青铜	110
3.4.11 镉青铜	122
3.4.12 白铜	124
参考文献	138

第4章 铜合金加工技术	139
4.1 概述	139
4.2 铜合金熔炼及铸锭成形	141
4.2.1 铜合金成分控制	141
4.2.2 熔炼设备	148
4.2.3 铜及铜合金熔炼	153
4.2.4 铜合金铸锭生产技术	157
4.2.5 铜合金铸锭组织及控制	170
4.2.6 铜合金铸锭缺陷及控制	171
4.3 铜合金板带材的加工	174
4.3.1 板带材生产工艺流程	174
4.3.2 热轧板带生产	175
4.3.3 冷轧板带生产	182
4.3.4 异型板带生产	184
4.3.5 铜合金热处理	186
4.3.6 酸洗、表面处理与矫平	189
4.4 铜合金管材和棒材加工	190
4.4.1 挤压加工	190
4.4.2 冷轧加工	195
4.4.3 拉伸加工	198
参考文献	203
第5章 铜合金材料的应用	205
5.1 概述	205
5.2 铜合金材料在电气工业中的应用	206
5.2.1 电力输送	206
5.2.2 电机制造	207
5.2.3 通讯电缆	212
5.2.4 住宅电气线路	216
5.3 铜合金材料在电子工业中的应用	218
5.3.1 电真空器件	218
5.3.2 印刷电路	218
5.3.3 集成电路	220
5.4 铜合金材料在交通运输方面的应用	225
5.4.1 船舶	225
5.4.2 汽车	230
5.4.3 飞机	237

5.5 铜合金材料在轻工业方面的应用	241
5.5.1 空调器和冷冻机	241
5.5.2 钟表	245
5.5.3 造纸	247
5.5.4 印刷	247
5.5.5 医药	248
5.6 铜合金材料在冶金工业中的应用	250
5.6.1 冶金设备	250
5.6.2 合金添加元素	252
5.7 铜合金材料在建筑和艺术方面的应用	256
5.7.1 管道系统	256
5.7.2 房屋装修	265
5.7.3 塑像和工艺品	266
5.7.4 钱币	270
5.8 能源及石化工业中的应用	272
5.8.1 石化、能源工业	272
5.8.2 海洋工业	274
5.9 在高科技方面的应用	276
5.9.1 计算机	276
5.9.2 超导和低温	277
5.9.3 航天技术	281
5.9.4 高能物理	281
5.9.5 火箭发动机	282
参考文献	283

第6章 铜合金新材料及其应用	286
6.1 无氧铜	286
6.1.1 概述	286
6.1.2 制备方法	287
6.1.3 物理化学性能	291
6.1.4 工艺性能	291
6.1.5 力学性能	292
6.1.6 基本特性及用途	293
6.2 铜基复合材料	294
6.2.1 概述	294
6.2.2 制备方法	295
6.2.3 物理化学性能	299

6.2.4	力学性能	302
6.2.5	基本特性及用途	304
6.3	弥散强化铜	307
6.3.1	概述	307
6.3.2	制备方法	309
6.3.3	物理化学性能	313
6.3.4	力学性能	314
6.3.5	基本特性及用途	320
6.4	电接触用铜合金	323
6.4.1	概述	323
6.4.2	制备方法	324
6.4.3	低压电器用电触头铜合金特性及用途	326
6.4.4	电阻焊及电接触加热表面硬化用铜合金特性及用途	331
6.4.5	真空开关和高压断路器用电触头铜合金特性及用途	332
6.5	引线框架铜合金	341
6.5.1	概述	341
6.5.2	引线框架铜合金的成分设计	344
6.5.3	引线框架铜合金的材料特性及技术特点	345
6.5.4	Cu-Fe-P 合金	346
6.5.5	超高强度 Cu-Ni-Si 合金	347
6.6	高速铁路接触线用铜合金	352
6.6.1	概述	352
6.6.2	国内外常用接触线	354
6.6.3	新型铜合金接触线	357
6.7	铜合金焊料	358
6.7.1	概述	358
6.7.2	铜基钎料基本特性及用途	360
6.7.3	铜基钎料的选用	363
6.8	定向凝固铜合金	365
6.8.1	概述	365
6.8.2	传统定向凝固技术	365
6.8.3	新型定向凝固技术	366
6.8.4	定向凝固单晶铜	368
6.8.5	定向凝固铜合金	372
6.9	快速凝固铜合金	373
6.9.1	概述	373
6.9.2	快速凝固制备技术	374

6.9.3	快速凝固晶态金属的组织结构特点	378
6.9.4	快速凝固铜合金的性能	379
6.10	非晶铜合金	380
6.10.1	概述	380
6.10.2	制备方法	380
6.10.3	非晶铜合金的性能	382
6.11	形状记忆铜合金	384
6.11.1	概述	384
6.11.2	形状记忆合金的特性	385
6.11.3	形状记忆铜合金的制备	386
6.11.4	形状记忆铜合金的晶粒细化	389
6.12	纳米功能铜合金	390
6.12.1	概述	390
6.12.2	纳米材料的特性	391
6.12.3	纳米材料的制备	392
6.12.4	纳米功能铜合金	393
6.13	艺术铜合金	397
6.13.1	概述	397
6.13.2	仿金铜合金	398
6.14	无铅黄铜	400
6.14.1	概述	400
6.14.2	无铅黄铜的基本特性及用途	401
	参考文献	403

第 1 章 铜合金概述

1.1 铜与人类文明

铜是一种传统而又现代的重要金属材料，在人类使用的所有材料中，铜对人类文明历史的重大影响是任何其他材料所无法比拟的，以至于人类文明发展史上有两个阶段以它的合金命名：青铜时代和亚青铜时代。18 世纪末，铜的优异导电性能又催生了工业革命，为现代文明奠定了基础。

铜是人类最早认识和使用的金属，也是人类用以制造工具的第一种金属。考古资料证实，远在一万年以前，在西亚就用铜来制作装饰件等物品。古埃及人在象形文字中，用带圈的十字架表示铜，含义是“永恒的生命”，赞誉了它经久耐用和可以重复再生使用的特性。人类从居无定所到定居，在从事农业生产和饲养牲畜的过程中，一直在使用铜。随着铜在生产和生活中的日益广泛应用，人类文明从石器时代步入了铜器时代。据记载，在阿纳托尼亚发现了公元前 5000 多年前人类社会最早的铜器。公元前 3000~4000 年，西班牙韦尔瓦地区的工匠们就在提炼铜。在中东地区的西奈荒漠中出土了公元前 3500 年前的最早的铜炉。在埃及，公元前 2750 年的基厄普斯金字塔内发现了铜水管，说明当时铜在工程上已得到重要应用。约在公元前 2500 年，发现了铜与锡形成的合金，生产出比纯铜更坚硬耐用的青铜器和青铜工具，进入了青铜器时代。公元前 1 世纪罗马人开始使用铜与锌的合金——黄铜，扩大了铜合金的品种和应用范围。

在中国，4000 多年前的夏禹时代就有了青铜器。距今 3000~3500 年的商、周年代，青铜器的使用达到了鼎盛时期。青铜器的种类、数量和制造水平远远超过了世界其他地区的任何文明。它们充分展现了中国古代社会的发达程度和中华民族的高度智慧。例如，铜钟铸造技术起源于当时的中国，从设计到制作工艺都很精细，反映了当时社会发展的水平。此后，该技术逐步传入西方，最后到达英国。英国的考古发现，铸钟出现在公元 1000 年左右。中国也是使用金属货币最早的国家，而金属货币中，历代又以铜币为主。可以说中国古代的货币史，实际上就是铜币史。

18 世纪末和 19 世纪初人类发现了电和磁，并利用了铜的优异导电性能，使电的应用得以实现，促进了工业革命的发展，并推动铜进入了一个新纪元。随着人类社会向电气化、自动化、信息化和网络化的方向迈进，铜在生产建设、人民生活以及高新技术上的重要作用日益明显。以铜合金为基础材料的微电子工业的兴起，使

铜的应用更是得到快速的发展，所以铜不仅是一种传统的非常有用的金属，而且还是重要的现代高新技术材料。

1.2 铜的基本特性

铜是 I B 族金属，元素符号 Cu，由于塞浦路斯岛上的古铜矿最为有名，拉丁文 Cuprum 和英文名称 Copper 即源出于此。其原子量 63.54，密度 $8.92\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，熔点 1083°C 。虽然地壳中铜只占 0.01%，但在自然界含铜的矿物分布却很广泛，如黄铜矿 (CuFeS_2)、辉铜矿 (Cu_2S)、斑铜矿 (Cu_3FeS_4)、赤铜矿 (Cu_2O)，蓝铜矿 ($2\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$) 和孔雀石 [$\text{CuCO}_3\cdot\text{Cu}(\text{OH})_2$] 等^[2]。纯铜呈浅玫瑰色或淡红色，表面形成氧化铜膜后，外观呈紫铜色。铜与金和银在元素周期表中同属一族，因而具有与贵金属相似的优异物理和化学性能。它塑性好、易加工、

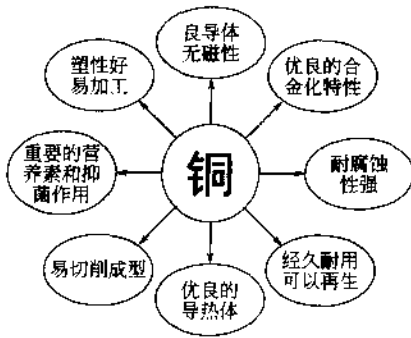


图 1-1 铜的性能

耐腐蚀、无磁性、美观耐用。特别是铜的导电性和导热性除略逊于银以外，是所有金属中最好的。由于银比较昂贵，因而铜是被广泛应用的最佳导体和导热体。铜的化学稳定性强，抗张强度大，易熔接，具抗蚀性、可塑性、延展性。纯铜可拉成很细的铜丝，制成很薄的铜箔。能与锌、锡、铅、锰、钴、镍、铝、铁等金属形成合金，可以进一步提高其强度、硬度、弹性、易切削性、耐磨性以及抗腐蚀等方面的性能，满足不同的使用要求^[1]。由于铜及其合金的优良特性，铜的

应用领域十分广泛。铜的性能如图 1-1 所示。

1.3 铜矿分布及种类

1.3.1 铜矿分布

从地区分布看，全球铜蕴藏最丰富的地区共有五个：①南美洲秘鲁和智利境内的安第斯山脉西麓；②美国西部的洛杉矶和大坪谷地区；③非洲的刚果和赞比亚；④哈萨克斯坦共和国；⑤加拿大东部和中部。

从国家分布看，世界铜资源主要集中在智利、美国、赞比亚、前苏联和秘鲁等国。智利是世界上铜资源最丰富的国家，其铜储量约占世界总储量的四分之一，2006 年智利的铜产量达到 530 万吨，占世界总产量的 38%，是世界最大的铜生产国和出口国。美国、日本是主要的精炼铜生产国。此外，赞比亚、前扎伊尔、德国、

比利时、秘鲁、加拿大、澳大利亚、巴布亚新几内亚、波兰、前南斯拉夫等也均是重要的产铜国。

1.3.2 铜矿的种类

世界铜成矿类型多样,按其地质-工业类型可分为斑岩型、砂页岩型、铜镍硫化物型、黄铁矿型、铜-铀-金型、自然铜型、脉型、碳酸岩型、矽卡岩型。

(1) 斑岩型 斑岩型铜矿是一种储量大、品位低、可用大规模机械化露采的铜矿床,矿石储量往往达几亿吨,铜品位常常小于1%,据世界上103个斑岩型矿床统计,单个矿床矿石量平均可达5.5亿吨,铜品位0.6%,它是世界上重要的铜矿工业类型之一。斑岩铜矿多分布在:①环太平洋带,包括南、北美洲大陆边缘狭长的斑岩铜矿带,如加拿大的洛涅克斯、伐利科帕;美国的宾厄姆、比尤特、莫伦锡、伊利、圣里塔;墨西哥的卡纳内阿、拉卡里达德拉;巴拿马的塞罗科罗拉多;秘鲁的米契基累、塞罗佛尔迪、夸霍内;智利的埃尔阿布拉、丘基卡马塔、拉埃斯康迪达、埃尔萨尔瓦多和埃尔特恩特等;②特提斯斑岩铜矿带,包括匈牙利的雷克斯克、南斯拉夫的麦丹佩克、伊朗的萨尔切什梅黑和巴基斯坦的查盖地区矿床等;③中亚、蒙古,重要的矿床有乌兹别克东部的卡耳马克尔、哈萨克斯坦巴尔喀什湖以北的科翁腊德、蒙古中北部的额尔德图间鄂博南部的察干苏布尔加和东部的阿伦诺尔矿床等。

(2) 砂页岩型 砂页岩型铜矿是泛指不同时代沉积岩中的层状铜矿,矿床产在一套沉积岩或沉积变质岩中,它是世界上铜矿主要工业类型之一,占世界铜储量30%左右,矿床以其规模大、品位高、伴生组分丰富为特点,因而其经济价值巨大。

该类矿床在世界上分布很广,除上述铜带外,还有前苏联乌多坎、杰兹卡兹甘铜矿,美国怀特潘,美国蒙大拿州西部一直延伸到加拿大西南部的贝尔特铜带,以及玻利维亚的科多铜带等,近年在阿富汗发现的巨大艾纳克铜矿和在巴西发现的萨洛博铜矿均属于此类型。

(3) 黄铁矿型铜矿 黄铁矿型铜矿是指与海底火山作用有一定联系的含大量黄铁矿和一定数量铜、铅、锌的矿床。目前世界上至少发现了420个这种类型的矿床,加拿大、美国、前苏联、西班牙、葡萄牙、塞浦路斯、南非和日本等都是该类矿床的重要产地。

(4) 块状硫化物矿 这种现代矿床是1978年在北纬21°附近的东太平洋脊上首次发现的,铜锌品位很高(铜6%、锌29%),同时在脊上发现了一个长970m、宽200m、高35m,拥有2500万吨矿量的多金属块状硫化物矿床,其矿石含铜最高为11%、含锌0.8%,还含少量的银(百万分之几)、钼(0.03%)和锡(0.03%)。1982年美国又继续在北纬13°的海域进行调查,又发现了好几个矿床。在前苏联这种类型却是头等重要的,占其铜总储量的30.6%,这种类型的重要矿床有:加拿大的萨德伯里、汤普逊、林累克;美国德卢斯杂岩;前苏联的贝辰加、诺里尔斯克、塔尔纳赫、“十月”;澳大利亚的卡姆巴尔德杂岩;芬兰的哥达拉赫带;还有我国金

川白家咀子的特大型。

(5) 其他类型 除上述几类外, 还有脉型、自然铜型、碳酸岩型、矽卡岩型等, 它们总共才占世界铜总储量的 3.6%, 但是对不同的国家来说, 这些类型也许是重要的, 如矽卡岩型对我国来说就是一个非常重要的工业类型, 占我国铜总储量的 28%。所以, 各国均应根据本国的具体地质环境, 寻找最具经济价值的优质矿床, 也就是品位高、规模大、形状合适、矿带边界明显、矿石易处理和含有价值的副产品的矿床, 以保证获得高利润和可以长期生产, 这些因素中最重要的是要有高品位, 这种高品位铜矿床最可能来源将是火山成因的黄铁矿型铜矿、层状矿床以及某些矽卡岩矿床等。

我国铜矿的分布已探明矿区 910 处, 主要为: 黑龙江省多宝山; 内蒙古自治区乌奴格吐山; 辽宁省红透山; 安徽省铜陵铜矿集中区; 江西省德兴、城门山、武山、水平; 湖北省大冶—阳新铜矿集中区; 广东省石碇; 山西省中条山地区; 云南省东川、易门、大红山; 西藏自治区玉龙、马拉松多、多麓松多; 新疆维吾尔自治区阿舍勒等铜矿。

1.4 铜的冶炼

1.4.1 铜的冶炼史

铜能够以游离态存在于自然界中。它们往往藏在地表岩石的缝隙里, 只要加热岩石然后用水迅速冷却使其裂开, 就可获得铜。但是, 这些铜矿大多数被开采完毕, 因为人类很早就开始使用铜。于是, 人类的祖先便开始用冶炼的方法获得铜。铜的冶炼, 写下了金属冶炼史的新篇章, 为铁及其他金属的冶炼提供了宝贵的经验。可以说铜的冶炼开辟了冶金史的新纪元。

铜的冶炼可以追溯到 5000 年前。考古学家在如今的以色列发现, 该地区公元前 4000 年就有了铜的冶炼。到了罗马帝国时代, 铜的生产得到扩张, 大部分产量来自塞浦路斯, 英国也开始了铜的开采。该时期最大的矿场, 并且在 19 世纪成为世界上第一大铜生产商的是西班牙南安大略西亚 (Andalusia) 的里奥·廷托 (Rio Tinto)。同一时期, 在远离欧洲的其他地区, 铜的生产也有进展。特别是在中国, 铜矿的开采始于公元前 2500 年的河南省, 并且当时的生产方式已相当先进。在北美, 密歇根州的 Keeweenaw 半岛开采的本地铜也有悠久的历史。

中世纪时期, 德国一些州成为铜开采的重要地区, 瑞典也成为主要生产国。到 18 世纪前期, 来自英国康沃尔郡 (Cornish) 铜矿产量的上升使英国占据了铜生产的领先地位, 并一直延续到 19 世纪中叶。即便如此, 在 18 世纪末英国的年产量也未能超过 800t, 世界总产量不超过 20000t。

到 1857 年, 智利铜产量终于超过英国, 两者的年产量分别为 24000t 和 17000t, 当时的世界总产量为 75000t。19 世纪后 50 年, 铜生产发生了根本性的变

化。首先最显著的变化是生产规模，至1900年铜产量几乎增长了10倍，达50万吨。其次，生产的地域分布也出现彻底地改变。曾占据相当长时间领先地位的英国，铜产量逐渐萎缩；而欧洲的其他国家，如德国，尤其是西班牙则重新占据重要地位；同时新兴国家及先前未曾开采的国家的铜生产逐渐凸出。到19世纪中期，日本仍然对西方紧闭国门，其20世纪初的铜产量则将近30000t/a；澳大利亚、加拿大及墨西哥的产量与之相差无几。智利的领先地位维持不久，到1890年铜产量便落后于美国。

事实上，直到19世纪50年代美国的铜产量依然很小。1881年在蒙大拿州的Butte发现巨大的辉铜矿矿层，铜含量达30%，从而改变了这种状况。快速上升的铜需求及1882年横贯亚利桑那州的铁路的通行促进了西南地区巨大矿藏的开发。产量的增长还得益于多项革新，包括矿石的浓缩，这项技术首次在Morenci实践，用以应对矿石品位下降的情况。到19世纪末美国铜的年产量超过25万吨。

然而，彻底改变美国及其他国家铜开采策略的最重要的改革发生在20世纪。19世纪末全球范围内的铜开采商都局限于将注意力集中在富矿上。尽管这类矿一般是通过表面露出地表的岩层发现的，但通常开采必须在地下进行。这类被开采的矿石品位很少低于10%。随着世纪的更换，问题接踵而来：如此高品位且适于开采的矿石储量不能够满足迅速发展的工业化和电子化引起的对金属的强烈需求。1903年，在美国犹他州盐湖城附近的Bingham Canyon启动对不同类型矿石的开采，这种斑岩矿的铜品位略高于2%，其他开采商对于此类矿通常会放弃。然而通过规模开发，生产铜的成本将是有竞争力的。许多后来开采的斑岩矿采用露天开采，这是个重要因素，因为通过此方法矿石开采的成本较低，并且可以引入机械化作业，此法还需一种新型的碾磨机来处理大量的矿石。

Bingham Canyon证明了通过大量开采低品位矿石的方法可以取得与开采资源较少的高品位矿石一样或更好的效果。有了这一先例，原先在北美和南美发现的许多储量极大的斑岩矿不再仅仅是地质考察上的成果，而成了潜在的矿山。这一方法推广的结果之一是使铜矿从地下开采转到露天开采，目前该类矿山占一半以上。随着开采效率越来越高，可开采的铜矿石品位逐渐降低。平均开采品位随铜价的波动而变化。近年来开采的铜矿的平均品位在0.85%左右。

采矿中最重要的先进技术之一是通过浮选对矿石进行浓缩以提高含铜量，这种方法取代了效率低下的重力浓缩法。这项发明来自英国，推动了低品位矿的开采。其他技术革新包括地下电轨拖运、更大型的机械铲、装载机、卡车、传送带、破碎及传输系统，这些设备可置于深坑中，根据需要进行调整。

就在Bingham Canyon启动的同一时期，刚果东南部的加丹加省也开始了铜矿的开采。最初的目标是贵金属，然而却发现巨大的氧化矿产中铜含量超过15%。在英国殖民地罗得西亚（独立后的赞比亚）南部边界也发现氧化矿，但品位低于在刚果发现的矿。直到1920年，该矿体才得到充分的开发与利用，并使得赞比亚一度成为世界第二大铜生产国。

智利是个例外，到 1950 年它是世界第二大产铜国。1950 年的铜产量分布与 100 年前已截然不同。在世界总产量 250 万吨中，美国占 82.5 万吨，遥遥领先于其他国家；智利产量为 36.3 万吨、赞比亚 28.1 万吨、加拿大 24 万吨、俄罗斯估计为 21.8 万吨、扎伊尔 17.6 万吨。而英国，一个世纪前最大的铜生产国却没有产出。到 2006 年智利铜产量已占全球铜产量的 35.5%，稳居世界第一。美国紧随其后，但铜产量仅占全球铜产量的 6%。

随着科学的发展，特别是电气工业的发展，对铜的精度要求越来越高，铜的冶炼也越来越复杂。为了获得高纯度的铜，必须经过电解精炼的方法。电解精炼法炼铜不仅能提高铜的纯度，还可以综合回收铜矿中的贵金属杂质，如金、银、硒、碲等。近年来为了从矿渣等铜废料中获得铜，还发展了生物冶铜法。

1.4.2 铜的冶炼技术

从最初的水炼法到近代的火炼法，铜冶炼技术的发展经历了漫长的过程，但至今铜的冶炼仍以火法冶炼为主，其产量约占世界铜总产量的 85%。铜的冶炼方法及基本原理如表 1-1 所示。

表 1-1 铜的冶炼方法及基本原理

冶炼法	基本原理
火炼法	$2\text{CuS} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CuO} + 2\text{SO}_2$
水炼法	$2\text{CuO} + \text{C} \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{Cu}$
电解精炼法	$\text{Fe} + \text{Cu}^{2+} \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{Cu}$
	$\text{Cu} - 2\text{e} \longrightarrow \text{Cu}^{2+}$
	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e} \longrightarrow \text{Cu}$

1.4.2.1 铜的火法冶炼

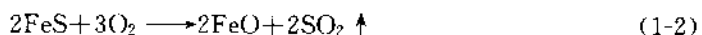
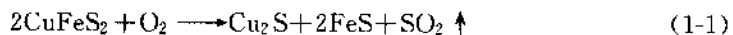
从矿石中提取金属铜，需要根据矿石种类的不同选择适当的冶炼方法。如氧化物矿可直接用碳还原；也可用“湿法”冶炼，酸性矿用硫酸溶解铜，碱性矿用氨水溶解铜，然后用电解或铁置换，析出铜。硫化物矿的冶炼过程比较复杂，下面简单介绍黄铜矿制精铜的工艺过程。

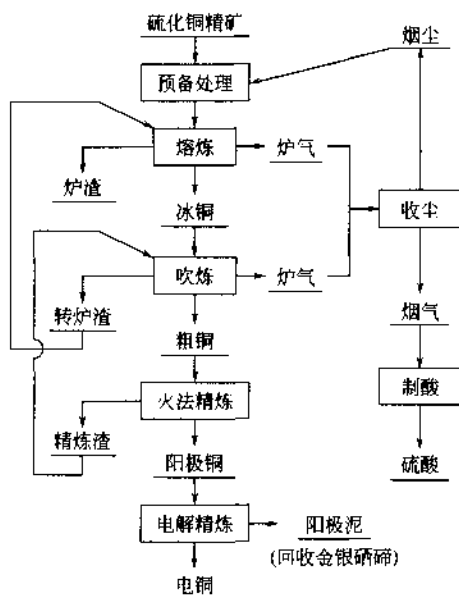
铜主要从黄铜矿提炼，“火法”或所谓“冰铜”冶炼法，其工艺过程包括铜矿富集、焙烧、除渣、顶吹还原、精炼等。其工艺流程如图 1-2 所示。

其冶炼步骤如下。

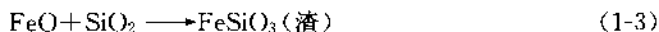
(1) 富集 低品位矿石冶炼前预先富集，即先粉碎矿石，在球磨机中磨成粉状后加到含浮选剂的水中搅拌，借助浮选剂的起泡与憎水作用将含铜微粒聚集在浮选池的上部，成为精矿。

(2) 焙烧 将浮选后的精矿经沉淀、过滤、烘干后，在沸腾炉中通空气进行氧化焙烧、脱硫（成 SO_2 ），同时除去挥发性杂质，如 As_2O_3 、 Sb_2O_3 等，并使部分硫化物变成氧化物。

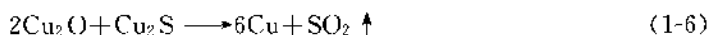
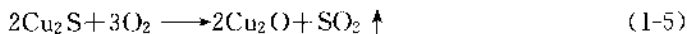


图 1-2 火法熔炼工艺流程图^[3]

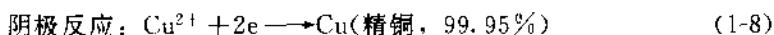
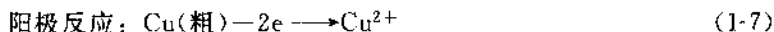
(3) 除渣 将焙烧过的矿石与沙子混合，在反射炉中加热至 1220~1350℃，FeS 氧化为 FeO 以后就和 SiO₂ 形成熔渣 FeSiO₃，因其密度小而浮在上层，而 Cu₂S 和剩余的 FeS 熔在一起生成所谓“冰铜”，并沉于熔体下层。



(4) 顶吹还原 把冰铜放入转炉，鼓风熔炼，得到约 98% 的粗铜，此粗铜又称泡铜。



(5) 精炼 工业上采用电解法将粗铜精炼除杂，在 CuSO₄ 和 H₂SO₄ 混合液的电解槽内，以粗铜为阳极，纯铜为阴极进行电解。



电解过程中原粗铜（阳极）所含杂质 Au、Ag 和 Pt 系金属沉积在阳极底部，成为“阳极泥”，是提炼贵金属的重要原料。

火法冶炼可以获得品位高达 99.9% 的电解铜。该流程简短、适应性强、生产效率高，铜的回收率可达 95%，但因矿石中的硫在造渣和吹炼两阶段作为二氧化硫废气排出，不易回收，易造成污染。近年来出现如白银法、诺兰达法等熔池熔炼以及日本的三菱法等，火法冶炼逐渐向连续化、自动化发展。

1.4.2.2 现代湿法冶炼

湿法冶炼是在溶液中进行的一种提铜的方法，无论是贫矿或富矿、氧化矿、硫