铜合金及其加工技术

王碧文 王 涛 王祝堂 编著



化学工业出版社

铜合金及其加工技术

王碧文
王　涛　编著
王祝堂

化学工业出版社
·北京·

本书全面介绍了纯铜、黄铜、青铜、白铜的性能特点和产品的应用知识，详细系统地介绍了铜合金的熔炼与铸造、铜管棒型线材生产和铜板带的生产技术。本书是作者多年工作经验的积累，内容翔实，资料齐全，查找方便，适合于铜与铜合金生产、加工企业的工程技术人员使用，亦可供大中专院校的材料工程、金属制品和压力加工等专业的师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

铜合金及其加工技术/王碧文，王涛，王祝堂编著.
北京：化学工业出版社，2006.11
ISBN 978-7-5025-9692-7

Ⅰ.铜… Ⅱ.①王…②王…③王… Ⅲ.铜合金-金属加工 Ⅳ.TG146.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 135543 号

责任编辑：陶艳玲　　装帧设计：史利平
责任校对：顾淑云

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　　装：化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm　1/16　印张 14¼　字数 352　千字　　2007 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：35.00 元

版权所有　违者必究

前　言

铜是一种古老而年轻的金属，从人类原始社会一直到科学技术高度发达的今天，它伴随着人类社会发展经历了漫长的沧桑岁月，一些传统的应用被一些新的金属材料所替代，而新的用途又为铜的应用提供了宽广的发展空间。铜的开采、冶炼、加工已经高度现代化、自动化，铜及铜合金已达250多种，分别具有高强度、高导电、高导热、高耐蚀等优良性能。铜及铜合金加工已形成现代重要的工业体系，分别以板、带、箔、管、杆、型、线等多种形式供国民经济和国防工业部门的需要。

中华民族是生产、使用铜及铜合金最早的民族之一，今天中国铜合金加工业已相当发达，已成为世界上重要的生产、进口、出口国家，铜加工材产量已居世界第一位，建设创新型铜及铜合金产业正取得重大进展。

撰写一本关于铜合金及其加工技术的专著是我们多年的愿望，为此，我们广泛收集了有关铜及铜合金的技术资料，进行了整理和汇编，并在书中介绍了铜的加工技术，以供同行参考。然而由于知识水平所限，有不足和疏漏之处敬请批评指正。

编著者

2006年10月于北京

目　录

1　概论 …… 1
1.1　铜的历史 …… 1
1.2　铜的资源 …… 2
1.3　铜的生产 …… 2
1.4　铜及铜合金加工 …… 4
1.5　铜及铜合金分类和标准化 …… 4
1.6　压力加工基本理论 …… 7
1.7　铜合金的组织与相变 …… 7
1.8　铜的合金化原则 …… 9
1.9　铜及铜合金腐蚀类型 …… 10
2　纯（紫）铜 …… 14
2.1　铜的原子结构、晶体结构 …… 15
2.2　纯铜的物理性能 …… 16
2.2.1　铜的颜色 …… 17
2.2.2　铜的密度 …… 17
2.2.3　铜的导电、导热和磁性 …… 18
2.3　铜的化学性能 …… 19
2.4　纯（紫）铜的力学性能 …… 20
2.5　元素对铜性能的影响 …… 25
2.5.1　氢 …… 25
2.5.2　氧 …… 25
2.5.3　锑、铋、硫、碲、硒 …… 26
2.5.4　砷、硼 …… 27
2.5.5　磷 …… 27
2.5.6　铅 …… 27
2.5.7　铁、锆、铬、硅、银、铍、镉 …… 28
2.5.8　锌、锡、铝、镍 …… 29
2.5.9　其他金属元素对铜的影响 … 29
3　黄铜 …… 30
3.1　铜-锌合金系 …… 30
3.2　简单黄铜 …… 35
3.3　铅黄铜 …… 37
3.4　锡黄铜 …… 39
3.5　铝黄铜 …… 42
3.6　镍、铁、硅、锰黄铜和多元复杂黄铜 …… 43
4　青铜 …… 45
4.1　概述 …… 45
4.2　锡青铜 …… 48
4.3　铝青铜 …… 54
4.4　铍青铜与钛青铜 …… 62
4.5　铜铬、铜锆、铜铬锆合金 …… 68
4.5.1　铜铬（铬青铜） …… 68
4.5.2　铜锆（锆青铜） …… 69
4.5.3　铜铬锆青铜 …… 69
4.5.4　合金元素及杂质对铬青铜、锆青铜、铜铬锆青铜的影响 …… 70
4.5.5　半成品生产 …… 74
4.5.6　合金的应用 …… 74
4.6　硅青铜和硅镍青铜 …… 75
4.7　铜铁合金 …… 80
4.8　锰铜-锰青铜 …… 83
4.9　银铜 …… 85
4.10　碲铜、碲磷铜 …… 87
4.11　铜-磷（Cu-P） …… 88
4.12　镉青铜 …… 89
4.13　铜-铋合金 …… 90
5　铜-镍合金——白铜 …… 92
5.1　Cu-Ni 二元系合金 …… 92
5.2　各元素对铜镍合金的影响 …… 92
5.2.1　锌的影响 …… 92
5.2.2　铁的影响 …… 93
5.2.3　锰的影响 …… 94
5.2.4　锡的影响 …… 94
5.2.5　硅的影响 …… 94
5.2.6　铝的影响 …… 94
5.3　工业用铜-镍合金 …… 94
5.4　热交换器用白铜 …… 97
5.5　锌白铜 …… 101
5.6　电工白铜 …… 105

6 铜及铜合金应用 …… 108
6.1 概述 …… 108
6.2 高强高导合金 …… 108
6.3 弥散强化无氧铜 …… 109
6.4 引线框架铜带和异型铜带 …… 110
6.5 变压器带 …… 114
6.6 电缆带 …… 115
6.7 水箱带 …… 116
6.8 连接器（接插元件）铜合金 …… 118
6.9 建筑铜管 …… 121
6.10 空调管 …… 125
6.11 冷凝管 …… 127
6.12 汽车同步器齿环材料 …… 130
6.13 电解铜箔 …… 132
6.14 铜及铜合金铸造产品 …… 133
6.15 艺术铜雕塑——南海观音铜像建造纪实 …… 136
6.15.1 前言 …… 136
6.15.2 仿金铜合金的研究 …… 137
6.15.3 普陀山南海观音仿金铜像建造概述 …… 140
6.16 铅黄铜管、棒、型材 …… 143
6.17 铸钢结晶器和高炉壁板铜合金 …… 144
6.18 铜及铜合金焊丝 …… 145
7 铜加工技术与装备 …… 149
7.1 概述 …… 149
7.2 铜及铜合金熔炼与铸锭 …… 150
7.2.1 感应熔炼和半连续铸锭 …… 150
7.2.2 感应熔炼和水平连铸 …… 161
7.2.3 管坯及线坯上引连铸 …… 164
7.2.4 真空感应熔炼和铸锭 …… 165
7.2.5 反射炉熔炼 …… 166
7.3 铜线坯（杆）连铸连轧 …… 167
7.4 高精铜及铜合金板带材生产 …… 171
7.4.1 板带材生产工艺流程 …… 171
7.4.2 锭铸加热 …… 177
7.4.3 热轧 …… 178
7.4.4 带坯表面铣削 …… 179
7.4.5 高精带材冷轧 …… 181
7.4.6 高精板带的热处理 …… 186
7.4.7 高精板带材的精整及剪切 …… 189
7.4.8 铜合金板带连铸连轧 …… 189
7.5 管、棒、型材生产 …… 191
7.5.1 概述 …… 191
7.5.2 热挤压 …… 192
7.5.3 铜扁线连续挤压 …… 195
7.5.4 冷轧管 …… 196
7.5.5 三轧行星轧制（PSW）和冷旋轧 …… 199
7.5.6 内螺纹管行星模滚轧 …… 200
7.5.7 管、棒、型材冷拉伸 …… 202
7.5.8 管、棒、型材热处理 …… 206
7.5.9 管、棒、型材精整和无损检查 …… 208
7.6 铜及合金线材生产 …… 208
附录 …… 214
附表1 美国铜及铜合金的状态符号 …… 214
附表2 加工铜及铜合金牌号对照 …… 214
附表3 常用元素的物理性能 …… 216
附表4 铜及铜合金的物理性能 …… 218
参考文献 …… 220

1 概　论

1.1 铜的历史

铜具有美丽的紫红颜色，优良的导电、导热、耐蚀性能，危害人类健康的许多病菌在铜的表面都不能存活，铜的提取、加工、回收并不困难，因此，从人类原始社会一直到科学技术高度发达的今天，铜一直伴随人类的沧桑岁月，为人类的进步做出了重大贡献。

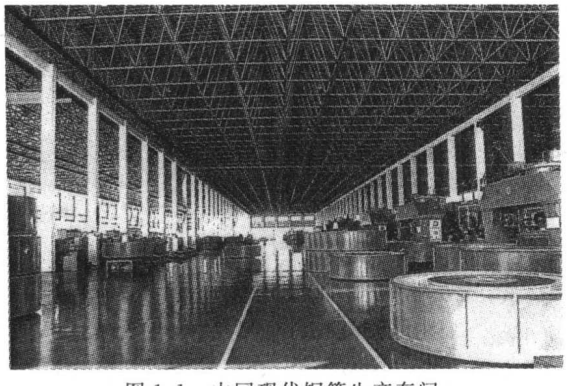


图 1.1　中国现代铜管生产车间

考古资料证实，铜是人类认识、开采、加工、使用最早的金属，远在一万年以前，西亚就用铜制作装饰品，古埃及人在象形文字中，用“♀”表示铜，其含义是“永恒的生命”；在公元前 2750 年的基厄普斯金字塔内发现了铜制水管；公元前 2500 年锡青铜的开发，使铜的硬度大为提高，为铜的使用打开了广阔的空间。中华民族在铜的开发中做出了重要的贡献。中国的青铜时代闪耀着中华民族创造智慧的光芒，青铜被广泛地用来制作生活用具、兵器、乐器、钱币、工艺品等，其种类、数量、制作水平远远超过世界其他地区。商王文丁所铸造的“司母戊”鼎，重达 875kg，花纹流畅、文字清晰、形象优美，堪称世界之最。中国宋代已经开始使用铜-镍-锌白铜制作生活用具，是世界上最早的仿银合金；湖北大冶铜录山是世界上的竖炉炼铜工场之一。



图 1.2　普陀山南海观音大佛佛像总高 20m，总质量 57t，铜-铝-镍-铟系合金。1997 年 10 月建造

当人类进入 21 世纪，铜的开采、冶炼、加工已经高度现代化、自动化，铜及铜合金已达 250 多种，分别具有高强度、高导电、高导热、高耐蚀等优良性能。铜及铜合金加工已形成现代重要工业体系，分别以板、带、箔、管、杆、型、线等多种形式供国民经济和国防工业部门的需要，从高新技术直至人们日常生活、从微电子技术到空调、冰箱、彩电，到处都有铜的身影，铜无处不在，铜与人类共舞，铜是人类的朋友。今天，中国铜工业生产和技术已相当发达和进步，铜加工材产量已居世界第一位，其中空调用高效散热管的制作技术和产品品质已走在世界前列（图 1.1）；1997 年洛阳铜加工厂建造的普陀山南海观音铜像，总高 20m，总重 57t，使用了铜-铝-镍-铟仿金

合金，造形优美，金光闪闪，被称为世界第一大仿金铜佛（图 1.2）。

1.2 铜的资源

铜元素在地壳中含量排序第 23 位，平均含量约为 7ppm(1ppm=1mg/kg)，1999 年美国地质调查局估计，世界陆地铜资源量为 16×10^8t，深海结核中铜资源估计为 7×10^8t。世界上含铜矿物约有 280 种，具有经济开采价值的矿物主要有铜的硫化物、氧化物、硫酸盐、碳酸盐、硅酸盐等，深海结核中铜的含量约为 0.5%；地球上铜储量最丰富的地区为环太平洋带，储量最大的国家是智利和美国，中国铜的储量居世界第七，铜的主要矿物列入表 1.1。

表 1.1 铜的各种矿物

矿物名称	分子式	铜含量/%	密度/(g/cm³)	颜色
斜方铜	矾 $Cu_3SO_4(OH)_4$	54.0	3.9	绿色
氯铜矿	$Cu_3(OH)_3Cl$	59.4	3.76	绿色
蓝铜矿	$Cu_3(OH)_2(CO_3)_2$	55	3.77	浅蓝色
斑铜矿	Cu_5FeS_4	63.5	5.06	红转褐色(“孔雀彩虹”色)
水胆矾	$Cu_4SO_4(OH)_6$	56	3.97	绿色
胆矾	$CuSO_4\cdot5H_2O$	25	2.29	绿色
辉铜矿	Cu_2S	79.9	5.5～5.8	灰黑色(烟灰色)
黄铜矿	$CuFeS_2$	34.6	4.1～4.3	黄色
硅孔雀石	$CuSiO_3\cdot2H_2O$	36.2	2.0～2.2	绿色转蓝色
铜蓝	CuS	66.7	4.6～4.7	纯蓝转靛
赤铜矿	Cu_2O	88.8	7.14	红色
硫砷铜矿	$CuAsS_4$	45.7/49	4.45	灰黑
脆硫锑铜矿	$Cu_3(SbAs)S_4$	43.3/47.9	4.52	灰/紫铜色
孔雀石	$Cu_2(OH)_2CO_3$	58	4.05	嫩绿色
砷黝铜矿	$(CuFe)_{12}As_4S_{13}$	35.7/53	4.6～5.1	灰转黑
黑铜矿	CuO	80.0	5.8～6.1	灰黑色
黝铜矿	$(CuFe)_{12}Sb_4S_{13}$	25/45.7	4.6～5.1	灰转黑

中国陆地铜资源储备并不贫乏，但是大型铜矿少，品位低，矿产铜远不能满足国民经济迅速发展的需求，为满足对铜的需求，中国正不断推进技术进步，加强找矿工作，同时不断增加铜精矿、粗铜、精铜、废杂铜的进口，我国已成为重要的原料进口国。

在铜的资源中，人们越来越注意工业用铜废料的回收和利用，铜的可贵之处在于铜的各种废料回收十分简单，各种工业零件报废之后，只需经过分拣就可以重新熔化成为有用的铜原料。有的可以直接生产各种铜合金加工材，有些可以通过电解精炼法生产阴极铜，所以各类铜的废料是宝贵的资源。各国铜的消耗量中，大致有 20%～40%来自再生铜。发展和利用再生铜技术，是铜工业中极为重要的技术经济问题，是满足对铜日益增长需求的重要来源。

1.3 铜的生产

随着科学技术的发展，金属铜的生产已高度机械化和自动化，其主要的生产工序有采矿、选矿、冶炼和电解精炼，目前含铜 0.5%以下的矿山已经广泛被开采，铜矿有露天和井下开采，矿石经破碎至 10mm 以后进行选矿，在获得含铜 20%～30%左右铜精矿后送去冶炼厂，80%的冶炼厂为火法冶炼，首先熔炼成含铜 30%～50%的冰铜，然后吹炼成含铜

99.0%的粗铜，最后送去电解，从而获得99.95%以上的阴极铜，可以直接供给用户使用，也可以供铜材加工厂作为铜原料，典型火法炼铜工艺流程见图1.3。湿法炼铜主要用于从氧化矿中生产铜，典型的氧化矿酸浸流程见图1.4，从尾矿和残留矿中回收铜通常采用堆浸法，从硫化铜矿中回收铜的细菌富集铜的研究正推向产业化。

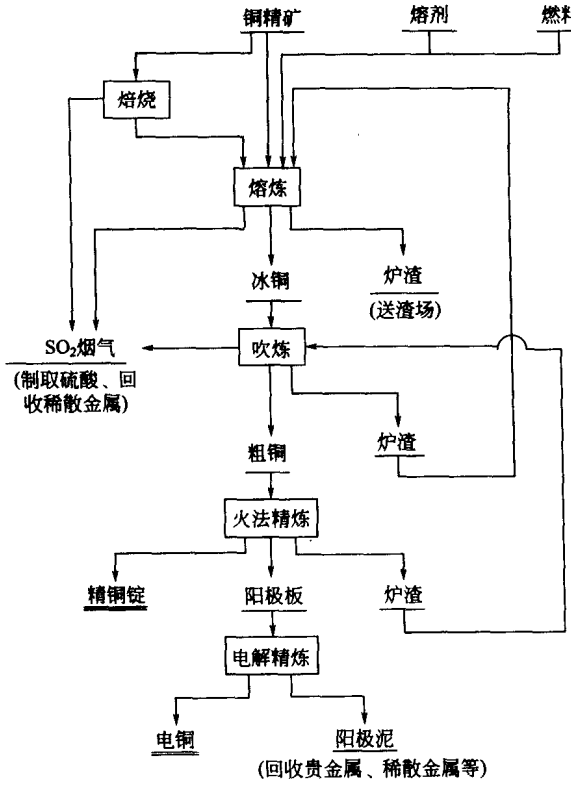


图1.3 火法炼铜流程

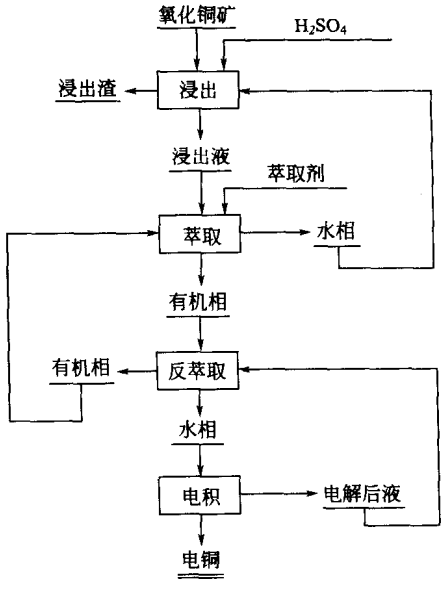


图1.4 氧化铜矿酸浸流程

再生铜的利用与生产方法尚在发展之中，目前利用的方法有两种，一种是直接经挑选后配制各种铜合金，生产各种铸件和铜加工材，一种是使用火法吹炼，获得粗铜锭，送阳极炉生产阳极板，然后经电解生产阴极铜，其缺点是废杂铜中有用合金元素在火法吹炼时大量烧损。

在铜的冶炼技术中，闪速熔炼是重大技术进步，已成为我国先进生产方法之一，我国重要的铜冶炼生产基地有江西铜业集团公司、铜陵有色金属（集团）公司、云南冶金集团总公司等，2004年产量见表1.2。

表1.2 2004年全国及主要省区或企业精铜产量 万吨

省区或企业	产量/($\times10^4$t)	矿产	再生	省区或企业	产量/($\times10^4$t)	矿产	再生
全 国	219.86	157.86	62.00	云南	22.46	20.37	2.84
上 海	14.34	8.24	6.1	甘肃	19.41	19.41	
江 苏	16.93	11.56	5.37	江西铜业集团公司	41.52	27.72	13.8
浙 江	16.58	2.46	14.12	铜陵有色金属(集团)公司	37.10	35.19	1.90
安 徽	37.10	35.19	1.90	云南铜业集团公司	22.46	20.37	2.08
江 西	41.52	27.74	15.8	金川集团有限公司	12.80	12.80	—
山 东	10.26	5.81	4.4	大冶有色金属公司	14.83	14.83	—
湖 北	17.69	17.79	—				

1.4 铜及铜合金加工

铜及合金加工包括合金制备、熔炼铸造、压力加工等重要工序，铜经过加工可以获得不同性能、不同颜色、不同形状的各种材料，用于国民经济和人民生活各方面；铜的加工已从原始个体劳动、简单火法熔炼、工具锤打等落后生产方式发展到今天高度现代化、微机控制、高度机械化的大工业。以压力加工为例，已形成感应电炉熔炼、连续铸锭、高精度热轧、热挤、高精冷轧、保护气体退火、在线品质量监督、无损探伤等自动化生产方法。生产的铜制品有板、带、条、箔、管、棒、型、线等；为进一步提高生产效率、节省能源、节省金属损耗、保护环境，铜及合金熔炼及压力加工中采用了保护气体熔炼、无氧化加热、保护气体退火、无酸洗生产、板带材卷式生产法、管样材盘式生产法、线材连铸连轧法等，已成为重要的生产技术；进一步压缩热加工工序，实现铜材生产从原料直至加工材成品的连续化生产是今后铜加工的发展目标。

中国铜加工业已成为世界铜加工业的重要组成部分，也是铜加工材重要的生产、消费、进口、出口大国（表 1.3），中国铜加工材主要产地位于东南沿海经济发达地区（表 1.4）。

表 1.3 “十五”期间中国铜加工材产量与消费 万吨

项 目	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	“十五”期间平均增长率/%
年产量	159.7	185.8	251.2	319.5	416.5	466.8	23.9
进口量	73.7	74.1	91.8	105.6	119.5	118.7	10.0
出口量	13.7	12.4	11.2	23.3	39.0	46.4	27.6
消费量	219.7	247.5	325.8	401.8	497.0	539.1	19.7

注：“十五”期间平均增长率 $Q_{2005}=Q_{2000}(1+x)^5$，以下同。

表 1.4 “十五”期间中国各地区铜加工材产量 万吨

项 目	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	“十五”期间平均增长率/%
全国铜材	159.7	185.8	251.2	319.5	416.5	466.8	23.9
浙江省	53.2	57.2	86.8	118.6	124.3	133.5	20.2
江苏省	37.8	40.2	48.7	68.1	104.4	99.9	21.5
广东省	13.5	20.7	35.9	41.7	61.1	81.6	43.3
河南省	11.7	13.3	15.0	19.3	23.0	25.7	17.1
安徽省	5.3	6.0	7.4	14.7	24.5	32.3	43.8
上海市	12.0	13.2	15.1	14.2	16.3	13.5	2.3
山东省	3.7	6.3	8.0	5.2	15.2	15.3	32.8
辽宁省	8.0	10.4	11.6	10.7	13.0	16.2	15.2

1.5 铜及铜合金分类和标准化

我国铜及合金分类习惯于按着色泽分类，一般分为四大类。

紫铜：系指纯铜，主要品种有无氧铜、紫铜、磷脱氧铜、银铜；

黄铜：系指铜与锌为基础的合金，又可细分为简单黄铜和复杂黄铜，复杂黄铜中又以第三组元冠名，如镍黄铜、硅黄铜等；

青铜：系指除铜-镍、铜-锌合金以外的铜基合金，主要品种有锡青铜、铝青铜、特殊青铜（又称高铜合金）；

白铜：系指铜镍系合金。

我国铜及铜合金标准化工作进展迅速，有关铜的国家标准分为四大类，一为基础标准，其中 GB 5231—2001 规定了加工铜及铜合金化学成分及产品形状；二为化学分析方法标准，规定了铜及合金中主要成分和杂质元素的化学分析方法；三为理化性能试验方法，其中包括了电阻系数、超声波探伤、涡流探伤、残余应力、脱锌腐蚀、无氧铜含氧量、断口、晶粒度等测定方法；四为产品标准，其中包括阴极铜、电工用铜线锭、铸造黄铜锭、铸造青铜锭、粗铜、硫酸铜、铜-铍中间合金、铜中间合金、铜精矿以及铜及合金加工材标准，见表 1.5～表 1.9。

表 1.5　板材标准

标　准　号	标　准　名　称	代替标准号
GB/T 2040—2002	铜及铜合金板材	GB/T 2040—80
GB/T 2044—80(1996)	镉青铜板	YB/T 792—71
GB/T 2045—80(1996)	铬青铜板	YB/T 698—70
GB/T 2046—80(1996)	锰青铜板	YB/T 782—75
GB/T 2047—80(1996)	硅青铜板	YB/T 557—70
GB/T 2049—80(1996)	锡锌铅青铜板	YB/T 702—70
GB/T 2052—80(1996)	锰白铜板	YB/T 558—70
GB/T 2056—80(1996)	铜阳极板	YB/T 490—65
GB/T 2529—89	铜导电板	GB/T 2529—81
GB/T 2530—89	照相制版用铜板	GB/T 2530—81
GB/T 2531—81	热交换器固定板用黄铜板	
GB/T 2532—1997	水箱水室用黄铜板带	GB/T 2532—81
GB/T 14594—93	无氧铜板和带	YB/T 700—70
GB/T 17793—1999	一般用途加工铜及铜合金板带材外形尺寸及允许偏差	

表 1.6　带、箔材标准

标　准　号	标　准　名　称	代替标准号
GB/T 2059—2000	铜及铜合金带材	GB/T 2059—89 GB/T 2060—89 GB/T 2062—89 GB/T 2066—89 GB/T 2071—89 GB/T 14595—93 GB/T 14596—93
GB/T 2061—2004	散热器散热片专用纯铜带、黄铜带箔材	GB/T 2061—80
GB/T 2069—80	铝白铜(BA16-1.5、BA113-3 带)	
GB/T 5187—85	纯铜箔	YB/T 462—64
GB/T 5188—85(1997)	黄铜箔	YB/T 559—65
GB/T 5189—85(1997)	青铜箔	YB/T 707—70
GB/T 5190—85(1997)	镍及白铜箔	YB/T 708—70
GB/T 5230—1995	电解铜箔	GB/T 5230—85
GB/T 11087—2001	散热器冷却管专用黄铜带	GB/T 11087—89
GB/T 11089—89	专用铅黄铜带	YB/T 706—80
GB/T 11090—89	雷管用铜及铜合金带	YB/T 706—80
GB/T 11091—89	电缆用铜带	YB/T 704—80
GB/T 15714—1995	焊接管用 H65 黄铜带	
GB/T 18813—2002	变压器铜带	
YS/T 29—92	电容器专用黄铜带	GB/T 2534—81
YS/T 30—92	纱管专用黄铜带	GB/T 2533—81
YS/T 323—2002	铍青铜条材和带材	YB/T 552—75
YS/T 466—2003	铜板带箔材耐热性能试验方法硬度法	

表 1.7 管材标准

标准号	标准名称	代替标准号
GB/T 1527—1997	铜及铜合金拉制管	GB/T 1527—87 GB/T 1529—87 GB/T 8006—87 GB/T 8007—87
GB/T 1528—1997	铜及铜合金挤制管	GB/T 1528—87 GB/T 1530—87 GB/T 8889—88
GB/T 1531—94	铜及铜合金毛细管	GB/T 1531—87
GB/T 8010—87(1997)	气门嘴用 HPb63-0.1 铅黄铜管	
GB/T 19447—2004	热交换器用铜及铜合金无缝管	GB/T 8890—88
GB/T 8891—2000	铜及铜合金散热扁管	GB/T 8891—88
GB/T 8892—88	压力表用锡青铜管	YB/T 712—70
GB/T 8893—88(1997)	矩形和方形铜及铜合金波导管	GB/T 715—70
GB/T 8894—88(1997)	圆形铜合金波导管	
GB/T 11092—89	黄铜焊接管	
GB/T 16866—1997	一般用途的加工铜及铜合金无缝圆形管材外形尺寸及允许偏差	
GB/T 17791—1999	空调与制冷用无缝铜管	
GB/T 18033—2000	无缝铜水管和铜气管	
GB/T 8891—2000	铜及铜合金散热扁管	
YS/T 451—2002	塑覆铜管	
YS/T 440—2001	内螺纹铜管	
YS/T 450—2002	冰箱用高清洁度铜管	
YS/T 462—2003	铜及铜合金管棒型线材产品缺陷	
YS/T 463—2003	铜及铜合金板带箔材产品缺陷	

表 1.8 棒材标准

标准号	标准名称	代替标准号
GB/T 4423—92	铜及铜合金拉制棒	GB/T 4423～4426—84 GB/T 4429～4433—84
GB/T 13808—92	铜及铜合金挤制棒	GB/T 4423～4426—84 GB/T 4429～4433—84
GB/T 13809—92	铜及铜合金矩形棒	GB/T 4427—84
GB/T 13812—92	黄铜磨光棒	
GB/T 12769—2003	钛铜复合棒	
YS/T 76—94	铅黄铜拉花棒	YB/T 1561—77
YS/T 77—94	铅黄铜针座棒	GB/T 4428—84
YS/T 334—95	铍青铜棒	YB/T 720—70

表 1.9 丝、线材标准

标准号	标准名称	代替标准号
GB/T 2903—1998	铜-铜镍(康铜)热电偶丝	GB/T 2903—89
GB/T 3114—94	铜及铜合金扁线	GB/T 3114—82
GB/T 3125—94	白铜线	GB/T 3125—82
GB/T 3134—82	铍青铜线	YB/T 565—65
GB/T 14953—94	纯铜线	GB/T 3109—82 GB/T 3119—82
GB/T 14954—94	黄铜线	GB/T 3110—82 GB/T 3130—82 GB/T 3113—82
GB/T 14955—94	青铜线	GB/T 3122～3124—82
GB/T 14956—94	专用铜及铜合金线	GB/T 2535—81 GB/T 3115—82 GB/T 3118—82 GB/T 3128—82

我国除国家标准外，还有行业标准和企业标准，为满足产品开发的需要，供需双方还可商定专用技术条件。

世界各国铜及合金产品均纳入国家标准，如美国 ASTM 标准、日本 JIS 标准、英国 BS 标准、德国 DIN 标准、法国 NF 标准、俄罗斯 ГОСТ 标准、国际标准 ISO、欧盟 BSEN 标准等；标准化工作对国民经济发展极为重要，同时也是铜材生产、研究、应用的总结，因此世界各国铜及铜合金标准都在不断地修订和完善，我国和国外主要铜材生产国铜及合金牌号对照列入附表 2。

1.6 压力加工基本理论

铜及铜合金压力加工技术是以金属学、金相学、金属物理、金属化学、弹塑性理论等学科为基础的一门综合性科学，同时它又指导着材料的生产，所以又是一门实用性很强的经验性科学，在从事铜及合金材料生产中，必须遵从的基本理论基础简述如下。

（1）金属塑性变形机理　金属原子规则排列组成了晶格，常见晶格有体心立方、面心立方、六方晶格等，在剪切应力作用下，原子层面沿着一定方向和晶面发生移动，造成了晶格畸变，产生了变形，主要变形机构有滑移和孪晶，变形首先发生在点阵缺陷处，又称作位错，位错有刃型、螺旋等类型，这就是单晶塑性变形的基本概念，然而工程金属绝大部分为多晶体，是由大小不一的晶粒和晶界所组成，晶粒又由方向各异的晶胞所构成，因此多晶体在外力作用下发生晶粒的转动、取向、晶粒内变形、晶间变形。塑性变形实质上是在外力作用下，原子发生移动的过程，是微观变形不断积累以致达到宏观变形的过程。

（2）弹塑性共存理论　金属在外力作用下，首先发生弹性变形，然后发生塑性变形，宏观变形是微观变形积累的结果。塑性变形在外力去除后是不能恢复的，在制定压力加工制度时，应充分考虑弹性变形的恢复问题，这是设计模具必须留有余量的根本出发点。

（3）体积不变定律　在压力加工中必须假定金属变形时其体积不变，这是计算变形程度和生产过程连续的重要基础。

（4）最小阻力定律　最小阻力定律主要内容是金属在变形过程中金属总是向阻力最小的方向流动，变形阻力除金属本身抵抗变形的变形抗力之外，主要是外摩擦，人们可以有效地利用这一定律达到人们所希望的金属塑性变形。

（5）变形不均匀原理　金属在发生塑性变形时，被加工的坯料的变形总是不均匀的，这主要是由于金属本身与外部条件总是不均匀的，这是分析产品品质问题和提高产品品质的基础，金属变形的不均匀性和金属保持自身完整性，导致变形不均匀区域的约束和反约束，出现压力加工制品的各种缺陷，所以这一基本观点在分析和改进产品品质方面有重要应用。

（6）金属变形的三大曲线　金属变形的三大曲线是：高温性能曲线、金属硬化曲线、金属软化曲线，它们是选择热加工温度、冷加工总加工率、道次加工率和退火温度的重要依据，是制定加工工艺流程的主要参考，对重要工业用合金三大曲线的收集、整理是重要的技术储备，金属变形三大曲线是压力加特性曲线的重要组成部分，也是铜加工技术的核心。

1.7 铜合金的组织与相变

铜能够与许多元素形成合金，这是铜极为重要的宝贵性质。

铜及合金材料的成分和加工过程决定着金属组织，而组织又对性能发生重大影响。铸造组织一般由柱状晶、等轴晶所组成，经压力加工后铸造晶粒被破碎，并沿着加工方向被拉长，在热加工和热处理中，在金属材料中发生多边化、再结晶、集聚再结晶过程，同时在铜合金材料中还伴随着固态相变，材料的晶粒大小、均匀程度、晶粒的取向、晶粒集团的取向、合金相的组成、相的分布、相的形态、化学成分的均匀程度等对材料的性能有着决定性的影响。一般规律是：晶粒和析出化合物细小、均匀、没有方向性，则材料的综合性能良好，反之材料性能变坏，并且各向异性。纯铜材料的金属组织由晶粒和晶界所组成，合金的晶粒由不同性质的合金相组成，晶界处还有各种析出物。常见的合金相有固溶体、中间化合物；铜基固溶体相多为置换式固溶体，即铜的晶格结点处铜原子被溶质元素原子所取代，而晶格结构与铜的一致、原子尺寸相差越小、电子浓度低，则有利于形成铜基固溶体、铜与镍、金、锰等元素，固态下可无限互溶，形成连续固溶体，锌、铝、锡等元素在铜中有很大的固溶度。重要的铜合金元素在铜中常温下的固溶度列入表 1.10，铜基固溶体随着温度的变化，元素在铜中的固溶度会发生重大变化，固溶度变化是通过在固溶体中析出单质溶质和化合物来实现的，与此同时合金性能会发生重大变化，最具代表性的变化是合金强度和电导率提高，人们正是利用这个原理进行铜合金材料的热处理。典型的热处理工艺是：高温下淬火（通常是 900～950℃、淬水），获得过饱和固溶体。此时合金塑性优良，适合进行压力加工，经过一定变形程度的冷加工，获得人们所希望的制品，然后进行时效处理（一般为 400～500℃），此时发生溶质元素的析出，材料的强度和电导率提高，人们往往把电导率的回升程度，作为热处理是否到位的重要指标。有些铜基固溶体在一定温度下还会发生有序化转变，同时伴随着强度、导电、磁性的变化；铜合金中的中间相是铜与金属和非金属相形成的化合物，其中包括有正常价化合物、电子化合物、原子尺寸因素化合物，常见的铜合金中间相列入表 1.11，这些化合物均为硬脆相。它们的形态、分布严重地影响着铜合金的性能。

表 1.10　重要合金元素在铜中固溶度　　%(质量)

元素名称	最大固溶度	室温固溶度	元素名称	最大固溶度	室温固溶度
氧	1050℃,0.008	≤0.002	锌	454℃,39.0	≤33
硫	800℃,0.002	0	锡	320℃,15.8	≤1.2
砷	689℃,8.0	6.0	铝	565℃,9.4	≤9.4
银	779℃,8.0	0.85	硅	552℃,4.65	≤2.0
镉	650℃,4.5	0.5	铍	866℃,2.7	≤0.2
铅	954℃,0.05	≤0.02	铬	1070℃,0.65	<0.03
磷	714℃,1.75	≤0.6	锆	965℃,0.15	<0.01
铁	1094℃,4.0	≤0.1	铋	800℃,0.01	<0.001

表 1.11　重要二元系铜合金中金属间相（稳定相）

合金系	相的代号	相结构	晶体结构	合金系	相的代号	相结构	晶体结构
Cu-Zn	β	CuZn	体心立方	Cu-Al	γ_2	Al_4Cu_9	复杂立方
	β′	CuZn	有序体心立方	Cu-Be	β	$BeCu_2$	体心立方
	γ	Cu_5Zn_8	有序体心立方		γ	$BeCu_2$	有序立方
Cu-Sn	β	Cu_5Sn	体心立方	Cu-Zr	β	Cu_5Zr	复杂立方
	δ	$Cu_{31}Sn_8$	复杂立方		γ	Cu_4Zr	复杂立方
	ε	Cu_3Sn	体心立方	Cu-Mg	β	$CuMg_2$	—
Cu-Al	β	$AlCu_3$	体心立方		γ	Cu_2Mg	有序面心立方

铜合金相变的研究是合金材料研究的基础，它以合金相图为基础，相图表示着在平衡状态下合金成分、温度、合金相之间关系，是研究合金相变和研制新型合金材料的重要依据。合金相图是在平衡状态下绘制的，工程实际情况会有很大变化，但是其规律是普遍应遵守的。

铜合金相图有二元、三元、四元和多元，按其相变类型又可把二元相图分为多种形式，铜合金依照合金成分和不同温度发生的主要相变过程如下：

液相向固相转变过程中有固溶体析出、共晶、包晶等相变，液相向固相转变均为形核长大过程，初生相随着温度下降，成分也在不断地变化着，成分的变化一般通过原子扩散来实现，由于工程条件不可能达到平衡条件的要求，所以晶内偏析、区域偏析都是不可避免的；共晶反应为一种成分的液体，在确定的温度下，同时结晶成两种新的固相，Cu-Ag、Cu-As、Cu-Mg、Cu-P、Cu-Ti、Cu-Zr、Cu-Te、Cu-Cr、Cu-Cd 等合金相图均存在着共晶转变；包晶反应是一定成分的液相和确定成分的固相在确定的温度下发生反应，生成一种具有确定成分的固相，Cu-Zn、Cu-Al、Cu-Sn、Cu-In 等为典型的包晶反应相图。

铜合金固态下相变主要有：

固溶体分解，其过程是过饱和固溶体——→G. P. 区——→亚稳定相——→稳定相，固溶体分解是通过从过饱和固溶体中析出单质和化合物来完成的，此类相变普遍存在于高铜合金之中；

共析转变是一种成分的固相，在确定的温度下，同时分解成两种新的固相；

包析反应为一种成分固相，在确定温度下与另一种成分固相发生反应产生一种新成分固相的过程；

共析与包析反应存在于 Cu-Zn、Cu-Al、Cu-Sn 等重要铜合金系中；

共格分解，又称斯皮诺达分解（Spinodal），是一种固溶体，在确定温度范围内发生分解，形成晶格相同，而合金成分不同的固溶体，如 Cu-Mn 合金系；

马氏体转变是一种非扩散型转变，只有晶体结构的变化而无成分变化，在 Cu-Zn-Al、Cu-Al-Mn 合金中，当发生热弹性马氏体转变时，合金表现有记忆性能和超弹性，重要铜合金相变列入表 1.12。

表 1.12　重要铜合金相变举例

合金系	相变反应公式	合金系	相变反应公式
Cu-Ag	$L_{71.9} \xrightarrow{780℃} \alpha_{7.9} + \alpha_{91.2}$	Cu-Sn	$\delta_{32.5} \xrightarrow{350℃} \alpha_{11} + \varepsilon_{35}$
Cu-Al	$L_{8.5} \xrightarrow{1037℃} \alpha_{7.5} + \beta_{9.5}$	Cu-Zn	$L_{37.5} + \alpha_{32.5} \xrightarrow{903℃} \beta_{36.8}$
	$\beta_{11.5} \xrightarrow{565℃} \alpha_{9.5} + \gamma_{15.6}$		$L_{59.8} + \beta_{56.5} \xrightarrow{835℃} \gamma_{59.8}$
Cu-Sn	$L_{25.5} + \alpha_{13.5} \xrightarrow{798℃} \beta_{22.0}$		$\beta_{48.9} \xrightarrow{465℃} \beta_{48.9}$有序转变
	$\beta_{24.6} \xrightarrow{585℃} \alpha_{15.8} + \gamma_{25.4}$	Cu-Cr	$\alpha_{0.65} \xrightarrow{1070℃→400℃} \alpha_{<0.03} + Cr$
	$\gamma_{27.0} \xrightarrow{520℃} \alpha_{15.8} + \delta_{32.4}$	Cu-Zr	$\alpha_{0.15} \xrightarrow{965℃→500℃} \alpha_{<0.01} + ZrCu_3$

1.8　铜的合金化原则

元素对铜的性能和组织的影响是不同的，为了研制出具有优良性能的铜合金，人们积累

了丰富的经验，许多重要的合金化原则是不能违反的。

（1）所有元素都无一例外地降低铜的电导率和热导率，凡元素固溶于铜中，造成铜的晶格畸变，使自由电子定向流动时产生波散射，使电阻率增加，相反在铜中没有固溶度或很少固溶的元素，对铜的导电和导热影响很少，特别应注意的是有些元素在铜中固溶度随着温度降低而激烈地降低，以单质和金属化合物析出，既可固溶和弥散强化铜合金，又对电导率降低不多，这对研究高强高导合金来说，是重要的合金化原则，这里应特别指出的是铁、硅、锆、铬四元素与铜组成的合金是极为重要的高强高导合金；由于合金元素对铜性能影响是叠加的，其中 Cu-Fe-P、Cu-Ni-Si、Cu-Cr-Zr 系合金是著名的高强高导合金；

（2）铜基耐蚀合金的组织都应该是单相，避免在合金中出现第二相引起电化学腐蚀。为此加入的合金元素在铜中都应该有很大的固溶度，甚至是无限互溶的元素，在工程应用的单相黄铜、青铜、白铜都具有优良的耐蚀性能，是重要的热交换材料。

（3）铜基耐磨合金组织中均存在软相和硬相，因此在合金化时必须确保所加入的元素除固溶于铜之外，还应该有硬相析出，铜合金中典型的硬相有 Ni_3Si、FeAlSi 化合物等。近年来开发的汽车同步器齿轮合金中 α 相为软相，β 相为硬相，α 相不宜大于 10%。

（4）固态有孪晶转变的铜合金具有阻尼性能，如 Cu-Mn 系合金，固态下有热弹性马氏体转变过程的合金具有记忆性能，如 Cu-Zn-Al、Cu-Al-Mn 系合金。

（5）铜的颜色可以通过加入合金元素的办法来改变，比如加入锌、铝、锡、镍等元素，随着含量的变化，颜色也发生红—青—黄—白的变化，合理地控制含量会获得仿金材料和仿银合金，如 Cu-7Al-2Ni-0.5In 和 Cu-15Ni-20Zn 合金系分别是著名的仿金和仿银合金。

（6）铜及合金的合金化所选择的元素应该是常用、廉价和无污染的，所加元素应该本着多元少量的原则，合金原料能够综合利用，合金应具有优良的工艺性能，适于加工成各种成品和半成品。

1.9 铜及铜合金腐蚀类型

铜及铜合金在大气、陆地水质、海洋气氛和海水中具有优良的耐蚀性能。铜及合金在工程中使用时，由于工作环境变化，特别是环境污染也会有腐蚀现象发生。主要腐蚀类型有：

（1）电化学腐蚀　这种腐蚀是由于不同性质材料之间电位差所引起的，负电性（阳极）加速腐蚀，而呈正电性则受到保护，铜对钢、铝等结构材料来说总是呈阴极，在互相接触时，如在海水中，铜及合金受到保护。

（2）冲击腐蚀　铜及合金制品表面随着腐蚀介质的运动而产生腐蚀，如海水管系中，当海水流速增加，特别是含有泥砂、气泡时将会引起冲击腐蚀，这是由于铜及合金之所以耐蚀，是因为其表面可以生成保护膜，介质的流动和冲刷会使保护膜破坏，从而导致金属腐蚀。工程使用经验表明，铜及合金管系内水速不应超过 3.5m/s。

（3）点蚀　这是一种局部腐蚀，对铜及铜合金制品危害最大，它的产生是由于制品表面化学成分不均、表面夹杂、生物附着、有机物沉积等造成氧化膜破坏，形成点状蚀坑，而这种蚀坑处与未发生腐蚀表面形成电化学腐蚀，蚀坑处为阳极，不断被腐蚀，最后可达穿孔地步，

造成管系泄漏。防止的办法是对管材经常进行清洗，对冷凝管来说早期成膜办法是十分有效的。

（4）应力腐蚀　在外界应力作用下或金属材料本身存在残余应力的情况下，铜及铜合金构件也会发生应力腐蚀。在铜合金中两相黄铜对应力腐蚀最为敏感，往往形成贯穿性裂纹，其中当介质中存在 H_2S 和氨气时，最易引发应力裂纹。

（5）脱锌腐蚀　这是黄铜材料中特有的一种腐蚀，在腐蚀介质中黄铜制品表面的锌被选择性优先腐蚀，此时在脱锌处形成多孔状海绵铜，引起材料破坏，防止办法是加入能够抑制脱锌的元素，如加入砷、硼等元素。

（6）晶间腐蚀　这种腐蚀是晶粒与晶界之间因化学成分差别所造成电位差而产生的一种腐蚀，晶粒处一般呈阴极，晶界呈阳极，因而晶界被腐蚀，所以晶粒粗大的铜合金制品易发生晶间腐蚀。

（7）生物腐蚀　各种生物在金属材料表面生长不但引起了该区域与未有生物生长区域之间电化学腐蚀，而且造成了管路堵塞，特别是在海洋工程中更为突出；铜及合金具有防止海洋生物生长的优良性能，因而以耐生物腐蚀而著称。

美国铜开发协会汇编了变形铜合金耐蚀等级表，如表 1.13，可供选材参考。表 1.13 中 E、G、F、P 分别表示耐蚀优良、良好、尚好、差等。

表 1.13　铜及其合金在各种腐蚀介质中的抗蚀等级

腐蚀介质	铜	低锌黄铜	高锌黄铜	特殊黄铜	磷青铜	铝青铜	硅青铜	铜镍合金	镍银	腐蚀介质	铜	低锌黄铜	高锌黄铜	特殊黄铜	磷青铜	铝青铜	硅青铜	铜镍合金	镍银
醋酸盐溶液	E	E	G	E	E	E	E	E	E	黑液，硫酸盐生产	P	P	P	P	P	P	P	G	P
醋酸	E	E	P	P	E	E	B	E	G	漂白粉(潮湿)	G	G	P	G	G	G	G	G	G
丙酮	E	E	E	E	E	E	E	E	E	硼砂	E	E	E	E	E	E	E	E	E
乙炔	P	P	P	P	P	P	P	P	P	波尔多液	E	E	G	E	E	E	E	E	E
乙醇	E	E	E	E	E	E	E	E	E	硼酸	E	E	G	E	E	E	E	E	E
乙醛	E	E	F	F	E	E	E	E	E	盐水	G	G	P	G	G	G	G	E	E
烷基胺	G	G	G	G	G	G	G	G	G	干燥溴	E	E	E	E	E	E	E	E	E
氧化铝	E	E	E	E	E	E	E	E	E	潮湿溴	G	G	P	F	G	G	G	G	G
氯化铝	G	G	P	P	G	G	G	G	G	丁烷	E	E	E	E	E	E	E	E	E
氢氧化铝	E	E	E	E	E	E	E	E	E	硫酸氢钙	G	G	P	G	G	G	G	G	G
硫酸铝和明矾	G	G	P	G	G	G	G	E	G	氯化钙	G	G	F	G	G	G	G	G	G
干燥氨	E	E	E	E	E	E	E	E	E	氢氧化钙	E	E	G	E	E	E	E	E	E
潮湿氨	P	P	P	P	P	P	P	F	P	次氯酸钙	G	G	P	G	G	G	G	G	G
氯化铵	P	P	P	P	P	P	P	F	P	甘蔗糖浆	E	E	E	E	E	E	E	E	E
氢氧化铵	P	P	P	P	P	P	P	F	P	石炭酸(苯酚)	F	G	P	G	G	G	G	G	G
硝酸铵	P	P	P	P	P	P	P	F	P	碳酸饮料	E	E	E	E	E	E	E	E	E
硫酸铵	F	F	P	P	F	F	F	G	F	干燥二氧化碳	E	E	E	E	E	E	E	E	E
苯胺及苯胺染料	F	F	F	F	F	F	F	F	F	潮湿二氧化碳	E	E	E	E	E	E	E	E	E
沥青	E	E	E	E	E	E	E	E	E	四氯化碳(干燥)	E	E	E	E	E	E	E	E	E
气氛：工业	E	E	E	E	E	E	E	E	E	四氯化碳(潮湿)	G	G	F	G	E	E	E	E	E
海洋	E	E	E	E	E	E	E	E	E	蓖麻油	E	E	E	E	E	E	E	E	E