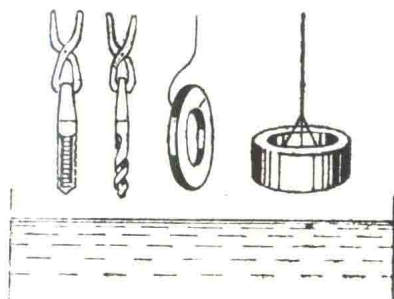


机械工业出版社

JIXIE GONGYE CHUBANSHI

铜及铜合金热处理

刘淑云 编



机械工业出版社

内容提要 本书主要内容包括：铜及铜合金的基本性能、分类、牌号表示及其用途，铜合金的热处理原理，各种黄铜、青铜（包括锡青铜、铝青铜、铍青铜、硅青铜、钛青铜以及镉、镁、铬、锆等其它青铜）的性能及其热处理，各种白铜的性能及其热处理，铜及铜合金热处理用设备，铜合金的缺陷等。书末还附有国内外铜合金牌号对照表。

铜及铜合金热处理

刘淑云 编

*
责任编辑：程淑华 责任校对：申春香
责任印制：卢子祥 版式设计：冉晓华

*
机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）
中国铁道出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 787×1092 $\frac{1}{8}$ ·印张 6 $\frac{1}{8}$ ·字数 136 千字
1990年10月北京第一版·1990年10月北京第一次印刷
印数 0,001—2,150·定价：4.00 元

*
科技新书目：228—014
ISBN 7-111-02164-9/TG·554

目 次

一 纯铜的性能及分类	(1)
1. 纯铜的性能 (1) —— 2. 杂质对纯铜性能的影响 (2)	
—— 3. 工业纯铜的分类、特性及用途 (6)	
二 铜合金的性能及分类	(9)
1. 合金元素的作用 (9) —— 2. 铜合金的分类 (10)	
三 铜合金热处理的原理	(12)
1. 均匀化退火 (13) —— 2. 去应力退火与再结晶退火 (16)	
—— 3. 固溶处理 (淬火) 与时效 (回火) (25)	
四 工业纯铜的热处理	(30)
五 黄铜的性能及其热处理	(34)
1. 黄铜的性能 (34) —— 2. 普通黄铜的牌号与用途 (39)	
—— 3. 特殊黄铜 (42) —— 4. 黄铜的热处理 (49)	
六 锡青铜的性能及其热处理	(74)
1. 锡青铜的性能 (74) —— 2. 锡青铜的热处理 (82)	
七 铝青铜的性能及其热处理	(85)
1. 铝青铜的性能 (87) —— 2. 合金元素对铝青铜性能的影响 (93) —— 3. 铝青铜的用途 (104) —— 4. 铝青铜的热处理 (104)	
八 铍青铜的性能及其热处理	(111)
1. 铍青铜的性能 (111) —— 2. 铍青铜的用途 (118) ——	
3. 铍青铜的热处理 (118)	
九 硅青铜的性能及其热处理	(134)
1. 硅青铜的性能及用途 (134) —— 2. 硅青铜的热处理 (138)	
十 钛青铜的性能及其热处理	(141)
1. 钛青铜的性能及用途 (141) —— 2. 钛青铜的热处理 (145)	

十一 其它青铜的性能及其热处理	(146)
1. 镉青铜的性能及其热处理 (146) —— 2. 镁青铜的性能及其热处理 (149) —— 3. 铬青铜的性能及其热处理 (152) —— 4. 锆青铜的性能及其热处理 (156)	
十二 白铜的性能及其热处理	(159)
1. 白铜的性能与用途 (159) —— 2. 白铜的热处理炉内气氛 (170)	
十三 铜及铜合金热处理用设备	(179)
1. 热处理设备 (179) —— 2. 热处理加热炉内气氛	(183)
十四 铜合金的缺陷	(188)
附表 铜合金各国牌号对照表	(192)

铜及铜合金是人类历史上使用最早的金属材料之一。由于铜具有优良的性能及美丽的色泽而被广泛应用于电缆、电器和电子设备的导电材料、各种热交换器的传热材料、建筑材料、装饰品等。随着科学技术的发展，使用范围不断扩大，目前，在尖端技术中铜及其合金也是不可缺少的材料，如在半导体、集成电路、大规模集成电路、超大规模集成电路、超导电线、超导电磁体、磁力悬浮铁路核聚变装置、形状记忆合金等方面都有应用。

一 纯铜的性能及分类

1. 纯铜的性能 纯铜因其表面形成一层氧化亚铜(Cu_2O)薄膜呈紫色，故又称为紫铜。

1) 纯铜具有优良的导电性，仅次于银，而居于第二位。

2) 无磁性是铜的一大特点。

3) 铜的导热性非常好，仅次于银。

4) 铜具有面心立方晶格，因而具有良好的塑性，可在冷、热状态下加工成各种规格的板材、带材、线材、管材、棒材、型材等。

5) 铜在极低温度下也不产生脆性。

6) 铜具有良好的抗腐蚀性能，铜在许多介质中很稳定，如在大气、水、水蒸气、热水中基本上不受腐蚀；在含有硫酸和含有 SO_2 的气体中或海洋性气氛中能产生一层致密即结实的保护薄膜，使铜的腐蚀速度减慢。但在氨或氨盐及氧化性的硝酸和浓硫酸介质中，铜的抗蚀性很差，在海水中的腐蚀速度也很快。

7) 具有良好的电镀和钎焊性能，铜容易镀金、镀银，

镀锌、镀锡和钎焊。

(一) 纯铜的物理性能：纯铜的物理性能如表 1 所示。

表1 纯铜的物理性能

性 能	数 值
原子量	63.54
晶体结构	面心立方
晶格常数 a ($\times 10^{-10}$ /米)	3.60758
熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	1083 ± 0.1
密度 ($\times 10^3$ 千克/米 ³)	8.89~8.95
热膨胀系数 20°C ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	16.5
比热容 (20°C) [千焦/(千克·开)]	0.388
热导率 (20°C) (瓦/(米·开))	391
电阻率 (20°C) ($\times 10^{-8}$ 欧·米)	0.017421
电阻温度系数 ($1/^{\circ}\text{C}$)	0.00680

(二) 铜的机械性能：铜的机械性能与它的状态有关，铜经冷加工如冷轧、冷拉等，其抗拉强度、屈服强度和硬度提高，而延伸率下降。冷变形后的铜在再结晶温度以上进行加热退火，则延伸率又重复升高。表 2 为纯铜在不同状态下的室温机械性能。

表2 纯铜的机械性能

状 态	σ_b	$\sigma_{0.2}$	E	σ_{-1}	δ	ψ	HBS
	(兆帕) (%)						
铸造	170	—	—	—	18	17	—
退火	240	70	110000	90	50	75	45
冷加工	450	330	120000	120	6	35	120

2. 杂质对纯铜性能的影响 杂质对铜的导热性能和导电性能影响很大。一切杂质元素，都会降低铜的导热性和导电性，但降低程度随元素不同而异，如图 1 所示。

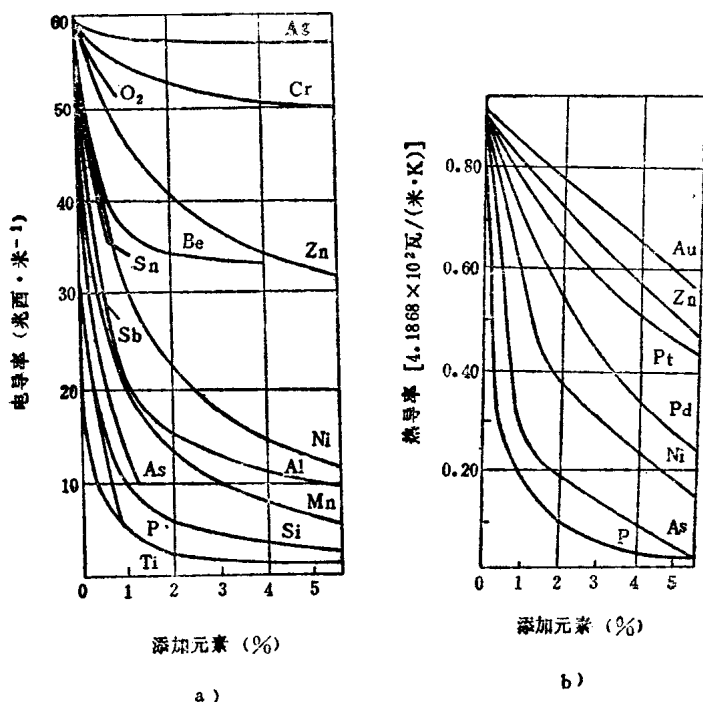


图 1 杂质对纯铜的电导率和热导率的影响
a) 电导率 b) 热导率

由图可见，磷 (P)、硅 (Si)、钴 (Co)、铍 (Be)、锰 (Mn) 等元素强烈地降低纯铜的导电性。微量的银 (Ag)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、锆 (Zr)、镁 (Mg) 对铜的导电性能影响不大。

铁和镍对铜的磁性能有影响，铁的影响最大，在制造罗盘和航空仪表时产生不利影响。

杂质对纯铜机械性能和塑性加工有很大影响。

由于铝(Al)、镍(Ni)、锡(Sn)、锌(Zn)、金(Au)、银(Ag)、砷(As)、锑(Sb)等元素在铜中的溶解度较大,因此,含量较少时对塑性加工无影响,并能提高强度和硬度。

纯铜由于塑性好,可用于挤压、压延等压力加工方法生产各种产品。在较低和较高的温度下塑性变形能力均很好,但在中温区 $300\sim 600^{\circ}\text{C}$ 时塑性剧烈降低。认为是由于存在杂质氢引起的。在此温度下,含有一定量氢的试样在拉应力作用下,氢从固溶体中析出,并在铜的晶界上聚集,处于高压状态,故易使铜开裂。随着温度的升高,氢又部分或全部固溶,使铜的塑性有所恢复。因此,纯铜热加工温度应高于 700°C 。一般轧制温度为 $700\sim 850^{\circ}\text{C}$,锻造温度为 $750\sim 850^{\circ}\text{C}$,挤压温度为 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 。

铋(Bi)和铅(Pb)等杂质在铜中的溶解度很小,而与铜形成低熔点共晶,Cu和Bi的共晶温度为 270°C ,而Pb与Cu形成共晶温度为 326°C ,这些共晶体呈薄膜状分布于晶界。当热加工温度超过共晶温度时,共晶体熔化引起热脆性。含Bi 0.005%就能形成几个原子尺寸厚度的共晶膜。Bi的危害比Pb大。

当有其它杂质元素存在时,如Se, As等元素与Bi能形成高熔点的金属间化合物,可减轻Bi的有害作用。氧化亚铜(Cu_2O)的存在也会产生有益的影响,这是因为与Bi能形成复合氧化物所致。

在铜材中应严格控制Bi和Pb的含量。Bi的最大含量不得超过 $0.002\sim 0.003\%$,Pb的最大允许含量为 $0.005\sim 0.03\%$ 。Pb的最大允许含量可比Bi稍高,这是因为Pb和As及O都能化合。

Te元素对热加工性能也能产生有害影响。在含氧量为

0.02%的铜中，微量的Te（1 ppm）就足以使轧制产生边裂。但磷脱氧铜对此不敏感，通常当含P量约为0.03%的条件下，只有当Te含量超过约0.008%时，才出现边裂问题。这可能是由于含Te的复合氧化物，因其熔点低，而使热加工性能恶化。

Te与Bi一样，熔炼时难以去除。因此，把Te降低到无害程度也只有在电解精炼阶段才能做到。

Se对铜性能的影响与Te相似，但含量可稍高一点。

气体杂质S、O等在铜中的溶解度很小，它们与铜能形成 Cu_2S 和 Cu_2O ，以 $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{S}$ 和 $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$ 共晶分布于晶界（如图2及图3所示）。但它们的共晶温度较高，分别为 1067°C 、 1065°C ，对热加工不产生有害的影响。而化合物 Cu_2S 和 Cu_2O 硬而脆，当S和O含量较高时，会降低机械性能和使冷加工困难，引起所谓的“冷脆”。因此，铜材中对S（0.005~0.01%）、O（0.02~0.1%）的含量应严加控制。S含量低时，对铜的热加工性能的影响与铜的含O量有关，对于无氧铜，S在凝固过程中以 Cu_2S 形态在晶界上产生薄膜状或球状结晶。含 Cu_2S 的无氧铜在氧化气氛高温加热过程中，氧易沿晶界渗透，导致热加工过程中产生表面龟裂。热轧试验证明，含S0.002%就可能出现问题。S能改善切削性能。

Cu_2S 和 Cu_2O 在形貌上相似，在显微镜明场下观察，它们均呈淡青色，但在偏振光下未腐蚀 Cu_2O 呈鲜红色，而 Cu_2S 仍呈淡青色。

铜中加入微量（0.001~0.3%）的稀土元素RE（Ce、Y或混合RE）能与Pb、Bi形成 Ce_2Pb 、 CePb 、 Bi_2Ce 等难熔化合物，不仅能消除Bi、Pb所引起的热脆，还有脱氧、除气的作用，提高塑性，改善产品的表面质量。铜中加入Ce

0.1~0.6% 晶粒显著得到细化，并能提高再结晶温度约100℃，因此，提高了材料的高温强度。无氧铜中加入Y0.1%或混合的RE，能显著提高电导率和在高温（600℃时）时的抗氧化能力。

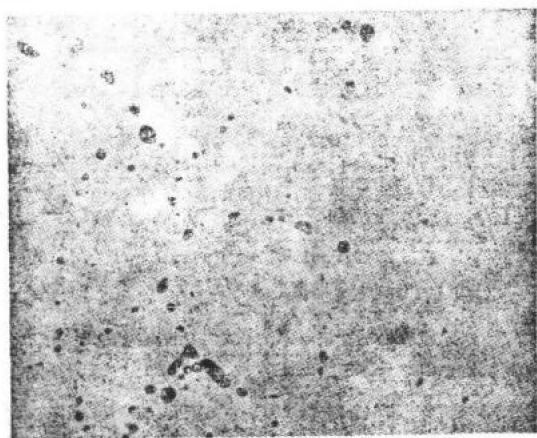


图2 Cu_2S 呈网状分布于 α 基体上

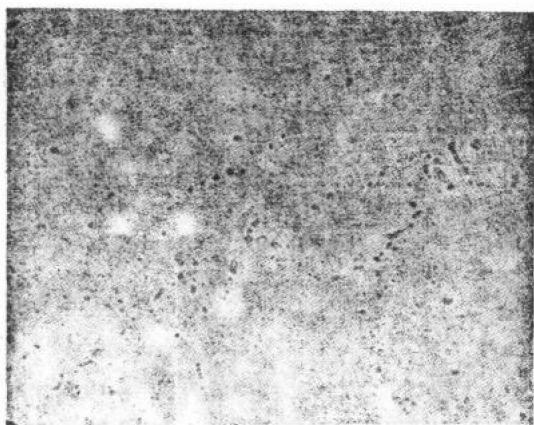


图3 纯铜经900℃、3小时退火 Cu_2O 沿晶界分布

3. 工业纯铜的分类、特性及用途 铜根据脱氧方法和

表3 纯铜的代号、化学成分 (GB5231—85)

类 别	代 号	主要成分 (%重量)			主要杂质 (%重量) (不大于)						
		Cu+ (不小于)	P	Mn	Bi	Sb	Pb	As	S	P	O
纯 铜	T1	99.95	—	—	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.001	0.02
	T2	99.90	—	—	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	—	0.06
	T3	99.70	—	—	0.002	0.005	0.01	0.01	0.01	—	0.1
	T4	99.50	—	—	0.003	0.005	0.05	0.05	0.01	—	0.1
无 氧 铜	TU1	99.97	—	—	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.003	0.003
	TU2	99.95	—	—	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.003	0.003
脱 氧 铜	TUP	99.5	0.01~0.04	—	0.003	0.05	0.01	0.05	0.01	—	0.01
	TUMn	99.6	—	0.1~0.3	0.002	0.002	0.007	0.002	0.005	0.003	—

含氧量的不同，可分为韧铜、无氧铜和脱氧铜三大类。

(一) 韧铜：是指含0.02~0.06%氧的纯铜。它的特点是熔炼及铸造方法简单，成本低，适用于生产电线锭坯。韧铜中含有适当的氧，能与P、Si、Fe、Sb等杂质形成氧化物，使溶解量减少，有利于导电性。但在高温还原性气氛中加热易出现氢病。

(二) 无氧铜：含氧量极低(0.001~0.003%)，它是在真空或一氧化碳气氛保护下熔炼的，具有很高的导电性、导热性能，在还原性气氛中加热也不会引起脆性。

表4 纯铜的特性与用途

牌 号	产品类型	特 性	用 途
T1	棒、箔	具有较高的导电、导热和耐蚀性能及优良的加工性能，在高温还原性气氛中加热易出现氢脆	主要用于导电、导热、耐蚀器件，如电线、电缆、雷管、化工用蒸馏釜、贮藏器及各种管道
T2	板、带、条箔管、棒、线材	有较好的导电、导热、耐蚀性及良好的加工性能，含降低导电性的杂质多，含氧高，易产生氢脆，不能在高温还原性气氛中加工使用	用作一般铜材，如电器开关、垫圈、垫片、铆钉、管嘴、油管、管道等
T3	板、带、条、箔、管、棒、线材等	有较好的导电、导热、耐蚀性及良好的加工性能，含降低导电性的杂质多，含氧高，易产生氢脆，不能在高温还原性气氛中加工使用	用作一般铜材，如电器开关、垫圈、垫片、铆钉、管嘴、油管、管道等
T4	板、带、条、管、棒材	有较好的导电、导热、耐蚀性及良好的加工性能，含降低导电性的杂质多，含氧高，易产生氢脆，不能在高温还原性气氛中加工使用	用作一般铜材，如电器开关、垫圈、垫片、铆钉、管嘴、油管、管道等
TU1, TU2 及高纯度无氧铜	条、带、管材	纯度高，导电性、导热性极高，无氢病。含磷极低的无氧铜，加热生成的氧化膜致密且不剥落，与玻璃封接性好，加工性、焊接性、耐蚀性、耐寒性均好	电真空器件
TUP	管、板、条材	焊接性、工艺性能、冷弯性能好，无氢脆，可在还原性气氛中加热使用，但不能在氧化气氛中使用	多以管材供应，也可做以板材，条材供应，一般做汽油、气体供应管，排水管，冷凝管，冷凝器，雷管，蒸发器，热交换器、火车零件等
TUMn	线材	软化温度比较高，受热不易变形，能保持尺寸稳定性，无氢病，有良好的工艺性能	用于电真空器件（如大功率振荡管的阳极及其它电子管的阳极底座）

(三) 脱氧铜：用磷或锰脱氧的铜称为磷脱氧铜或锰脱氧铜，其含氧量小于或等于0.01%。脱氧铜具有优良的延展性、焊接性和耐蚀性，在还原性气氛中加热时也不会产生脆性。由于磷脱氧铜中残留少量的固溶磷，会降低其导电性，因此应严格控制P含量在0.004~0.04%范围内，若用于焊接时，P应控制在上限。

磷脱氧铜除导电性能有所降低外，其它性能则无多大变化，而且延伸率($\delta\%$)和断面收缩率($\psi\%$)均比韧铜高。另外，还可以提高再结晶温度及焊接性能。

纯铜的牌号是用汉语拼音字母T表示，无氧铜用U表示，磷脱氧铜用TUP表示，锰脱氧铜用TUMn表示。纯铜的牌号、化学成分见表3。

常用纯铜的种类、特性与用途如表4所示。

二 铜合金的性能及分类

纯铜有很多可贵的性能，但它的强度低，导电、导热性能、弹性、切削性能远远满足不了工业发展的需要。如近年来，电动机、发电机等电气设备由于绝缘材料的耐热性的提高，正在努力提高金属材料的容许使用温度（即提高从室温到300℃间的机械性能）。又如，利用铜及铜合金在极低温超导现象的核聚变发电装置等尖端技术及日常生活中不可缺少的液化丙烷气（液化温度228开）、液化天然气（液化温度111开）的液化气技术等都要求材料具有良好的极低温性能。为此，要求进一步提高铜的性能，其基本途径是通过合金化及辅之以热处理来实现。

1. 合金元素的作用 铜合金中常加入的合金元素有：Zn、Sn、Al、Ni、Si、Be、Ti、Fe、Zr、Cr、Mg、S、

Pb、Se、Cd、Mn、B、P等。

P、Mg、Mn、Si、B元素一般用于Cu冶炼时进行脱氧。

Pb、S、Zn、Se等元素主要用于提高铜的切削性能。

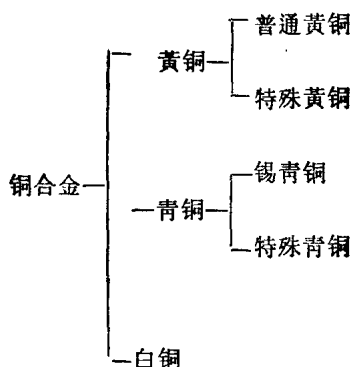
Zn、Sn、Al、Ni、Ag、Si、Cd、Ti、Cr、Zr、Be、Co、Fe等元素，通过固溶强化和析出强化使铜的强度大大提高。

Mg、Fe、Al、Ni可以提高合金的耐腐蚀性能。

铜中加入合金元素后，通常使电阻值增加，降低了导电性。在Cu中加入Fe、Co、Cr、Bi等元素的合金，可以进行低温时效，使导电性能和机械性能大大提高。

加入合金元素后，还可提高铜的弹性，改变磁性，如Cu-Mn-Al系合金具有强磁性。在Cu-Fe-P系合金中因添加铁后，合金也显示出微弱的磁性。

2. 铜合金的分类 铜合金按化学成分可分为黄铜、青铜及白铜三大类。



(一) 黄铜：普通黄铜是以锌为主要合金元素的铜合金。

特殊黄铜：在普通黄铜的基础上，加入 Al、Sn、Pb、Si、Mn、Fe、Ni 等元素的黄铜称为特殊黄铜。

黄铜的编号方法是以汉语拼音字母“H”起首，后面是两位数字。数字是表示合金中含铜量的百分数。例如，H80 即表示含铜80%的黄铜。

特殊黄铜的编号方法是，代号“H”+主加元素符号+铜含量+主加元素含量。例如，HPb59-1，表示含铜59%、含铅1%的铅黄铜。

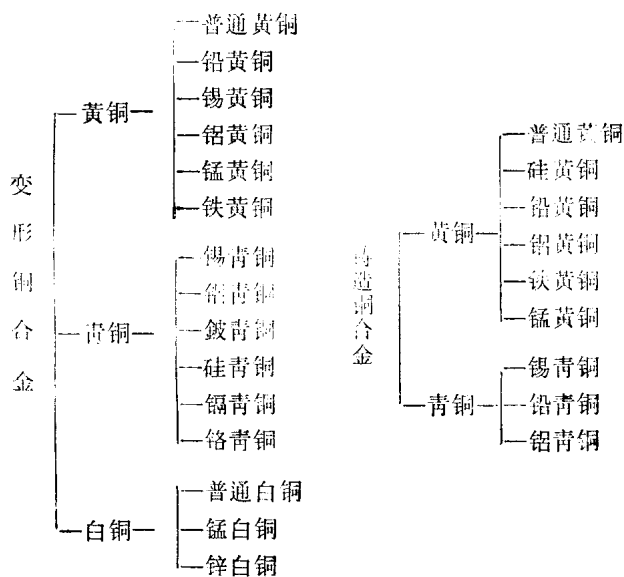
(二) 青铜：除黄铜、白铜以外的铜基合金称为青铜。青铜中比较重要的有锡青铜、铝青铜、铍青铜、硅青铜、铬青铜等。

青铜的编号方法是：以青铜汉语拼音字母“Q”为起首+主加元素符号+主加元素的含量。例如，QSn7表示含Sn7%的锡青铜。若合金中还含有其它添加元素，则只写添加元素的百分含量。例如，QSn6.5-0.4，表示含Sn6.5%及P0.4%的锡-磷青铜。又如QAl10-3-1.5，表示含Al10%、Fe3%及Mn1.5%的铝-铁-锰青铜。

(三) 白铜：以镍为主要合金元素的铜基合金称为白铜。其编号方法以汉语拼音字母B为起首，随后附Ni的平均含量，若添加第三元素，则在B字后边增附该元素的化学符号和平均含量。例如，B30，表示含Ni30%的白铜，BMn3_12表示含Ni3%、Mn12%的锰白铜，又如QAl6-1.5，表示含Ni6%和Al1.5%的铝白铜。

铜合金除按成分分类外，按生产工艺又可分为变形铜合金和铸造铜合金两类（见下页）。

铜合金的性能通常是指合金的使用性能及工艺性能。使用性能包括合金的机械性能、物理性能、化学性能；工艺性能包括铸造性能、可锻性、切削性能、热处理、焊接性能等。



上述性能是由合金的组织与结构决定的。一般合金元素在铜中有一定的溶解度能形成固溶体，当溶质元素含量超过它在铜中溶解度时，将形成化合物。由于化合物具有金属性质，称为金属间化合物。因此，铜合金的性质就决定于以铜为基的固溶体和金属间化合物的结构、数量、形态、大小及分布等。金属间化合物的特点是硬而脆，随着它的数量的增加，合金的强度、硬度提高而塑性下降。所以，铜合金中的金属间化合物的数量要严格加以控制。

三 铜合金热处理的原理

铜合金的热处理目的与其它合金一样，通过改善铜合金

的组织状态可达到所需要的使用性能和工艺性能。由于铜合金无同素异构转变，因此，它与钢铁的热处理不同。铜及铜合金的最常用的热处理工艺可分为退火（均匀化退火、去应力退火和再结晶退火）、固溶处理（淬火）及时效（回火）或固溶处理后进行形变和时效。在未讨论热处理工艺之前，首先讨论铜合金在热处理时组织与性能的变化规律，为以后介绍具体的铜合金热处理工艺奠定基础。

1. 均匀化退火 铜合金均匀化退火的目的是为了消除或减少铸锭、铸件枝晶偏析等成分不均匀性。

当合金在非平衡结晶时，均产生晶内偏析，以Cu-Ni合金为例，说明合金产生晶内偏析的过程。

金属从液态转变为固态的过程称为结晶，而结晶的过程是先形成晶核，然后晶核进一步长大，直至液相全部消失为止。晶核长大方式，在一般情况下是以枝晶形式生长，即在晶核开始成长的初期，晶粒外形大多数是比较规则，但随着晶粒的生长，枝晶棱角形成，棱角处的散热条件优于其它部位，因而得到优先生长，如树枝一样长出枝干，再长出分枝，最后把晶间填满。这种成长方式叫枝晶成长。

图4为Cu-Ni合金状态图，合金的结晶过程是以枝晶方式成长。最先生成的枝干含高熔点的元素Ni较多，而后生成的枝干含高熔点的Ni逐渐减少，含铜较高。因此，在一个晶粒内就出现成分不均匀现象，称晶内偏析或称枝晶偏析，其显微组织如图5所示。由图可见， α 固溶体呈树枝状，先结晶的枝干富Ni，不易浸蚀呈白亮色，而后结晶的枝晶间富铜，易受浸蚀而呈暗黑色。图5中的铸造Cu-Ni合金经均匀化退火后的组织特点，是枝晶偏析消除而形成均匀单相固溶体，如图6所示。

当在极其缓慢冷却条件下平衡结晶时，可通过Ni和Cu