

重有色金属材料

加工手册

第 **1** 分册

冶金工业出版社

# 重有色金属材料加工手册

## 第一分册

《重有色金属材料加工手册》编写组 编

冶金工业出版社

**重有色金属材料加工手册**

**第一分册**

《重有色金属材料加工手册》编写组 编

责任编辑：向培森

(限国内发行)

\*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张 32 字数 768 千字

1979年6月第一版 1979年6月第一次印刷

印数00,001~25,700册

统一书号：15062·3400 定价（科四）3.75元

## 出版说明

根据我国社会主义建设的需要和有色金属材料加工战线广大职工的迫切愿望，我们组织有关单位，在系统总结建国二十多年来有色金属材料及其加工技术经验的基础上编写了一套《手册》陆续出版。

这套书共分四种，即《重有色金属材料加工手册》、《轻金属材料加工手册》、《贵金属材料加工手册》和《稀有金属材料加工手册》。洛阳铜加工厂、东北轻合金加工厂、冶金工业部贵金属研究所和宝鸡有色金属加工厂分别为上述四个《手册》编写组的组长单位。各《手册》均是在组长单位党委领导下，由参加编写单位和执笔的同志，依据总的编写原则，结合各专业具体情况共同负责编写的。

《重有色金属材料加工手册》按篇分成五个分册出版。第一分册：重有色金属及其合金；第二分册：熔炼和铸锭；第三分册：板带材生产；第四分册：管棒材生产；第五分册：线材生产。

这本书系《重有色金属材料加工手册》第一分册——重有色金属及其合金，详细叙述了紫铜、黄铜、青铜、白铜、镍和镍合金以及铅、锌、锡、镉等金属合金的成分、组织、性能和用途；介绍了机械、腐蚀性能，金相测试等检验方法；附录中列有元素的理化性能和常用计量换算表。主要供从事重有色金属材料加工生产部门的技术人员、工人使用，亦可供科研、设计、教学和使用部门的有关人员参考。

考虑到印刷质量及印装方便，该书金相图全部集中书末。

参加本书编写的单位和人员有：洛阳铜加工厂李名洲、夏立信、李著恺、孔昭文、杨海云、黄维忠、叶同发、余树康、陈桂媛、徐振文；中南矿冶学院张纬斌、曹明盛；沈阳有色金属加工厂彭兴邦、余怡谷、李义宝、伍招才；西北铜加工厂赵学仲、张志超、张宗禄；广州锌片厂张德强；东北工学院陈家民；昆明工学院张利衡；洛阳有色冶金设计院龙志英；上海铜厂柳大敏；上海有色金属压延厂陈炳兴；上海有色合金线材厂梅品修；上海东风有色合金厂张瑞华；上海合金厂徐正国。

本书在编写和修改过程中，还得到了全国许多单位和有关同志的大力支持及协助，对本《手册》进一步充实和提高起了重要作用，特此致谢。

由于我们组织编写这种书籍的经验不足，书中可能存在缺点或错误，请广大读者批评指正。

一九七八年七月

# 目 录

## 第一篇 重有色金属及其合金

<b>第一章 紫铜</b> .....	1	<b>第三章 青铜</b> .....	147
<b>第一节 杂质及微量元素对铜的影响</b> .....	1	<b>第一节 锡青铜</b> .....	147
一、杂质及微量元素对铜的导电、 导热性的影响 .....	2	一、合金元素和杂质对 锡青铜的影响 .....	151
二、杂质及微量元素对铜的软化 温度和晶粒大小的影响 .....	4	二、加工锡青铜的成分、用途 .....	162
三、杂质及微量元素对铜的压力 加工性能的影响 .....	5	三、加工锡青铜的化学性能 .....	163
四、杂质及微量元素各论 .....	7	四、加工锡青铜的物理、机械性能 .....	166
<b>第二节 加工用紫铜的成分、       性能和用途</b> .....	27	<b>第二节 铝青铜</b> .....	174
一、加工用紫铜的成分、 特性和用途 .....	27	一、合金元素和杂质对 铝青铜的影响 .....	179
二、加工用紫铜的化学性能 .....	29	二、加工铝青铜的成分、用途 .....	186
三、加工用紫铜的物理性能 .....	40	三、加工铝青铜的化学性能 .....	187
四、紫铜材的织构及各向异性 .....	45	四、加工铝青铜的物理、 机械性能 .....	190
五、加工用紫铜的机械性能 .....	49	<b>第三节 铍青铜</b> .....	204
<b>第二章 黄铜</b> .....	57	一、合金元素和杂质对 铍青铜的影响 .....	207
<b>第一节 简单黄铜</b> .....	57	二、加工铍青铜的成分、用途 .....	212
一、简单黄铜的组织 .....	57	三、加工铍青铜的化学性能 .....	212
二、简单黄铜的性能与 含锌量及组织的关系 .....	59	四、加工铍青铜的物理、 机械性能 .....	214
三、简单黄铜中杂质的影响 .....	66	<b>第四节 钛青铜</b> .....	226
四、简单黄铜的成分、 性能和用途 .....	68	一、合金元素和杂质对 钛青铜的影响 .....	227
<b>第二节 复杂黄铜</b> .....	93	二、加工钛青铜的成分、用途 .....	237
一、合金元素对铜-锌合金的影响 .....	93	三、加工钛青铜的化学性能 .....	237
二、复杂黄铜的成分、性能和用途 .....	104	四、加工钛青铜的物理、 机械性能 .....	238
1. 铅黄铜 .....	104	<b>第五节 硅青铜</b> .....	241
2. 锡黄铜 .....	112	一、合金元素和杂质对 硅青铜的影响 .....	243
3. 铁黄铜 .....	121	二、加工硅青铜的成分、用途 .....	249
4. 镍黄铜 .....	124	三、加工硅青铜的化学性能 .....	249
5. 铝黄铜 .....	126	四、加工硅青铜的物理、 机械性能 .....	252
6. 锰黄铜 .....	133	<b>第六节 锰青铜</b> .....	257
7. 硅黄铜 .....	137		
<b>第三节 黄铜的化学性能</b> .....	139		

一、合金元素和杂质对 锰青铜的影响 .....	258	化学性能 .....	338
二、加工锰青铜的成分、用途 .....	261	四、结构白铜及镍铜合金的 物理、机械性能 .....	342
三、加工锰青铜的化学性能 .....	261	第四节 精密电阻用白铜和 镍合金 .....	358
四、加工锰青铜的物理、 机械性能 .....	261	一、3-12锰白铜 .....	358
第七节 铬青铜和镉青铜 .....	264	二、40-1.5锰白铜 .....	365
一、合金元素和杂质对铬青铜、 镉青铜的影响 .....	266	三、无镍锰白铜 .....	369
二、加工铬青铜、镉青铜的 成分、用途 .....	266	四、镍-铬系高电阻精密合金 .....	371
三、加工铬青铜、镉青铜的 化学性能 .....	266	第五节 热电偶用白铜和镍合金 .....	372
四、加工铬青铜、镉青铜的物理、 机械性能 .....	268	一、镍铬-镍锰(镍硅) 热电偶合金 .....	374
第八节 铍青铜 .....	275	二、改良型镍铬-镍硅热电偶合金 .....	381
一、合金元素对铍青铜的影响 .....	277	三、镍钴-镍铝热电偶合金 .....	383
二、加工铍青铜的成分、用途 .....	278	四、镍铬-43-0.5锰白铜 热电偶合金 .....	389
三、加工铍青铜的化学性能 .....	279	五、铜-锰白铜和铁-锰白铜 热电偶合金 .....	391
四、加工铍青铜的物理、 机械性能 .....	279	六、套管热电偶(铠装热电偶) .....	392
<b>第四章 镍、白铜和镍合金</b> .....	287	七、补偿导线用的白铜 .....	393
第一节 加工纯镍和阳极镍 .....	287	<b>第五章 铅、锌、锡、镉及其合金</b> .....	396
一、合金元素和杂质对镍的影响 .....	287	第一节 铅及铅合金 .....	396
二、加工纯镍和阳极镍的成分、 用途 .....	301	一、铅的耐蚀性 .....	396
三、镍的化学性能 .....	303	二、杂质和合金元素对铅的影响 .....	398
四、镍的物理、机械性能 .....	306	三、加工铅和铅合金的成分、 性能和用途 .....	403
第二节 电真空用镍及镍合金 .....	314	第二节 锌及锌合金 .....	408
一、电真空用镍及镍合金的 性能要求 .....	314	一、锌的耐蚀性 .....	409
二、合金元素和杂质对镍电真空 性能的影响 .....	314	二、杂质和合金元素对锌的影响 .....	411
三、电真空用镍及镍合金的 成分、用途 .....	316	三、加工锌及锌合金的成分、 性能和用途 .....	419
四、电真空用镍合金的物理、 机械性能 .....	319	第三节 锡及锡合金 .....	422
第三节 结构白铜及镍合金 .....	322	一、锡的耐蚀性 .....	423
一、合金元素和杂质对白铜及 镍铜合金的影响 .....	322	二、杂质和合金元素对锡的影响 .....	423
二、结构白铜及镍铜合金的成分、 用途 .....	336	三、加工锡及锡合金的成分、 性能和用途 .....	424
三、结构白铜及镍铜合金的		第四节 镉 .....	427
		一、杂质和微量元素对镉的影响 .....	427
		二、加工纯镉的成分、性能和用途 .....	427
		<b>第六章 金相、机械性能和腐蚀的检验</b> .....	429
		第一节 金相检验 .....	429
		一、低倍检验 .....	429
		二、高倍检验 .....	429

三、紫铜、无氧铜含氧量测定 .....	439	8. 体积单位换算 .....	480
四、晶粒度测定 .....	440	9. 容量单位换算 .....	480
五、显微硬度测定 .....	442	10. 重量(质量)单位换算 .....	480
第二节 机械性能检验 .....	443	11. 密度(比重)单位换算 .....	480
一、拉力试验 .....	443	12. 角度单位换算 .....	480
二、硬度试验 .....	453	13. 速度单位换算 .....	481
三、冲击韧性试验 .....	456	14. 力单位换算 .....	481
四、其他机械性能试验 .....	457	15. 力矩单位换算 .....	481
第三节 腐蚀检验 .....	463	16. 压力、应力及强度单位换算 .....	481
一、常用的腐蚀检验和试验方法 .....	463	17. 功能单位换算 .....	482
二、其他腐蚀试验 .....	467	18. 功率单位换算 .....	482
附录 .....	468	19. 小数英寸→毫米换算 .....	482
1. 常用符号名称对照表 .....	468	20. 厘米↔英寸换算 .....	483
2. 元素的物理性能 .....	469	21. 公斤/平方厘米↔磅/平方英寸换算 .....	484
3. 元素的晶体结构 .....	473	22. 摄氏↔华氏常用温度换算 .....	485
4. 元素的电极电位 .....	474	23. 新旧温标的转换系数 .....	486
5. 常用计量单位及换算关系表 .....	475	24. 有色金属硬度换算 .....	487
6. 长度单位换算 .....	479	25. 希腊字母表 .....	488
7. 面积单位换算 .....	479		

# 第一篇 重有色金属及其合金

## 第一章 紫 铜

纯铜通常呈紫红色，故称紫铜。紫铜具有好的导电、导热、耐蚀和可焊等性能，并可冷、热压力加工成各种半成品，工业上广泛用于制作导电、导热和耐蚀等器材。

### 第一节 杂质及微量元素对铜的影响

紫铜中杂质主要来自原料，同时与熔炼等工艺也有关。很多种杂质即使含量极少（甚至十万分之几）也剧烈降低铜的导电、导热和压力加工等性能。

为改善铜的性能，有时须添加某些其它微量元素，或容许某些脱氧剂元素在铜中保持一定残留量。

紫铜可按其所含杂质及微量元素的不同，分为三类：

1. 加工紫铜 有T1、T2、T3、T4等，特点是氧含量较高；
2. 无氧铜及脱氧铜 有TU1、TU2、TUP、TUM<sub>n</sub>等，特点是氧含量极少，在脱氧铜中还残留少量脱氧剂元素；
3. 特种铜 有砷铜、银铜、碲铜等；特点是分别加入了不同的微量元素。

为便于讨论杂质和微量元素对铜的性能的影响，可按这些杂质和微量元素与铜的相互作用特征来分类，见表1-1-1。

杂质和微量元素的分类及其对铜性能的影响

表 1-1-1

按杂质和微量元素对铜的作用来分类	包括的元素	组织特征	对铜性能的影响
固溶于铜的杂质及微量元素	铍、镁、钛、锆、铬、锰、铁、钴、镍、钨、铂、银、金、锌、镉、铝、镓、铟、硅、锗、锡、磷、锑、砷、等，其中镍、锰、钨、铂、金还与铜无限固溶	$\alpha$ 固溶体	1. 都不同程度地提高铜的硬度和强度，同时，实际不降低铜的加工塑性 2. 都不同程度地降低铜的导电性和导热性；其中以钛、磷、铁、硅、砷等降低最多，铍、铝、锑、锰、镍等次之，而银、铬、镉、镁、锌、锆等降低较少。降低导电率较少的元素，有的还常用作高强、耐磨、耐热的导电铜材
很少固溶于铜，并与铜形成易熔共晶的杂质及微量元素	铅、铋等	铜含铅或铋的共晶	铅、铋呈易熔共晶分布在铜的晶粒边界，热压时易开裂；铋还降低铜的室温塑性，使铜“冷脆”。铅、铋对铜的导电、导热性影响不大。铅可改善铜的切削性



按杂质和微量元素对铜的作用来分类	包括的元素	组织特征	对铜性能的影响
几乎不固溶于铜、并与铜形成熔点较高的脆性化合物的杂质及微量元素	氧、硫、硒、碲等	在铜的晶粒边界含有Cu <sub>2</sub> O, 或Cu <sub>2</sub> S, 或Cu <sub>2</sub> Se, 或Cu <sub>2</sub> Te等脆性化合物的共晶	降低铜的塑性。对铜的导电、导热性影响不大 硒、碲均提高铜的切削性

一、杂质及微量元素对铜的导电、导热性的影响

所有杂质及微量元素均不同程度地降低铜的导电性和导热性。固溶于铜的元素（除银、镉以外）对于铜的导电性和导热性降低较多，而呈第二相析出的元素则对于铜的导电、导热性降低较少。图1-1-1至图1-1-4及表1-1-2至表1-1-3分别表明杂质及微量元素对

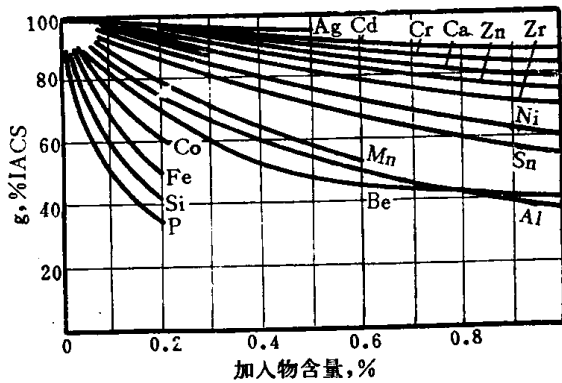


图 1-1-1 各种元素对铜的导电性的影响

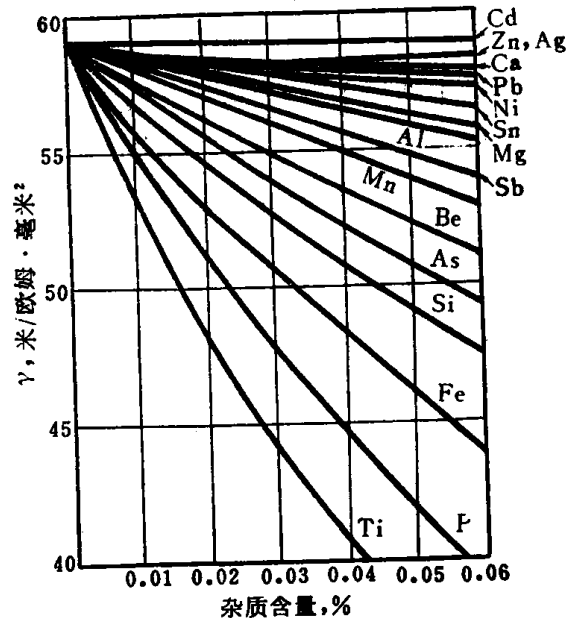


图 1-1-2 杂质对铜的导电性的影响

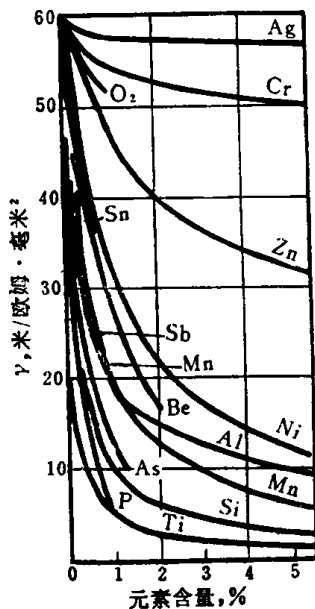


图 1-1-3 元素对铜的导电性的影响

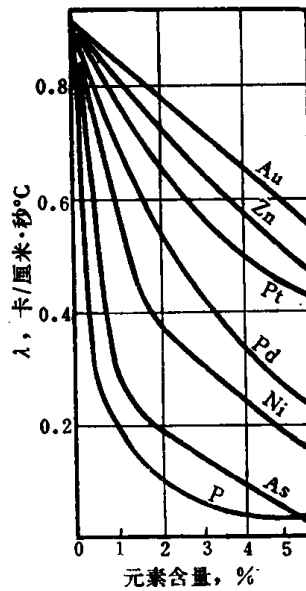


图 1-1-4 元素对铜的导热性的影响

铜的导电、导热性影响和导电、导热性的换算关系。铜中各种杂质对铜的导电性影响相当于各单个元素影响的算术和。

金属的导电性可用导电系数（单位：米/欧姆·毫米<sup>2</sup>）表示，也可用1913年制定的国际软铜（Cu + Ag ≥ 99.90%，退火后，20°C时的电阻系数为0.017241 欧姆·毫米<sup>2</sup>/米或1.7241微欧姆·厘米，导电系数为58.0米/欧姆·毫米<sup>2</sup>）导电率标准（IACS）作为100%加以比较和确定。现在铜的纯度大大提高，其导电率已增到102%IACS以上。加工因素对铜的导电率也有一定影响，很大的冷加工率可使铜的导电率下降约2%IACS。

铜中杂质或微量元素的原子电阻系数增值 ( $\frac{\Delta\rho}{a}$ ) 及电阻系数的计算式 表 1-1-2

元素	在室温时的溶解度, % (重量)	$\frac{\Delta\rho}{a}$ , 微欧姆·厘米 % (原子)	$\frac{\Delta\rho}{a}$ 波动范围	电阻系数的计算式
银	0.1	0.6	0.1~0.6	铜中含几种杂质时的电阻系数 $\rho$ (微欧姆·厘米) 可用下式计算: $\rho = 1.667 + A\% (\text{原子}) \left\{ \frac{\Delta\rho}{a} \right\}_A + B\% (\text{原子}) \left\{ \frac{\Delta\rho}{a} \right\}_B$ 式中 $\frac{\Delta\rho}{a}$ —— 原子电阻系数增值, 微欧姆·厘米/ % (原子); A、B —— 杂质元素。 元素在铜中形成第二相时, 则偏差太大, 不宜用此式计算
铝	9.4	0.95	0.8~1.1	
砷	6.5	6.7	6.6~6.8	
金	100	0.55	0.5~0.6	
硼	0.06	1.4	1.4~2.0	
铍	0.2	0.65	0.6~0.7	
钙	实际不溶	(0.3)	未定	
镉	<0.5	0.3	0.21~0.31	
钴	0.2	6.9	6.0~7.0	
铬	<0.03	4.0	3.8~4.2	
铁	0.10	8.5	8.5~8.6	
镓	21	1.4	1.3~1.5	
锗	11	3.7	3.6~3.75	
铟	3.0	1.1	1.0~1.2	
铋	1.5	(6.1)	未定	
锂	实际不溶	(0.7)	未定	
镁	1.0	(0.8)	未定	
锰	24	2.9	2.8~3.0	
镍	100	1.1	1.1~1.15	
氧	约 0.0002	5.3	4.8~5.8	
磷	0.5	6.7	6.7~6.8	
铅	0.02	3.3	3.0~4.0	
钡	40	0.95	0.9~1.0	
铂	100	2.0	1.9~2.1	
铊	20	(4.4)	未定	
铷	约 0.0003	9.2	8.7~9.7	
铯	2	5.5	5.4~5.6	
硒	约 0.0004	10.5	10.2~10.8	
硅	2	3.1	3.0~3.2	
锡	1.2	3.1	2.8~3.5	
碲	约 0.0005	8.4	8.4~8.5	
钽	0.4	(16)	未定	
钨	实际不溶	(3.8)	未定	
锌	30	0.3	0.28~0.32	

铜及铜合金的导热系数与导电率之间有着内在的联系。在某一温度下的导热系数  $\lambda$  可根据在该温度下的导电率 (%IACS) 按  $\lambda \approx \%IACS/100$  估算。导电率  $g > 25 \sim 30\%IACS$

铜及铜合金于20°C时的导热系数和导电率近似换算表

表 1-1-3

20°C时的导电率 g %IACS	20°C时的导热系数 λ, 卡/厘米·秒·°C									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.018	0.028	0.038	0.047	0.057	0.067	0.077	0.086	0.096	0.106
10	0.116	0.126	0.136	0.146	0.156	0.166	0.176	0.186	0.195	0.205
20	0.215	0.225	0.235	0.245	0.255	0.265	0.275	0.285	0.294	0.304
30	0.314	0.324	0.334	0.343	0.353	0.363	0.373	0.382	0.392	0.402
40	0.411	0.421	0.431	0.440	0.450	0.460	0.470	0.479	0.489	0.499
50	0.508	0.518	0.528	0.537	0.547	0.556	0.565	0.574	0.584	0.593
60	0.602	0.611	0.620	0.629	0.638	0.647	0.656	0.665	0.674	0.682
70	0.691	0.699	0.708	0.716	0.724	0.733	0.741	0.749	0.757	0.766
80	0.774	0.782	0.790	0.798	0.806	0.814	0.821	0.829	0.837	0.845
90	0.852	0.860	0.867	0.875	0.882	0.890	0.897	0.905	0.912	0.920
100	0.927	0.934	0.941	0.949	0.956	—	—	—	—	—

注：本表用法如下，例如20°C的导电率为15%IACS时，则20°C的导热系数为0.166卡/厘米·秒·°C。

的导电、导热、低合金化铜合金，其导热系数还可用下式估算：

$$\lambda = 0.01596\gamma + 0.002(100 - x)$$

式中  $\gamma$  —— 试验测知的合金导电系数，米/欧姆·毫米<sup>2</sup>；

$x$  —— 含铜量，%(重量)。

## 二、杂质及微量元素对铜的软化温度和晶粒大小的影响

铜的软化温度和晶粒大小，影响到铜的加工和使用性能。而杂质及微量元素对铜的软化温度和晶粒大小影响又很大。

固溶和生成弥散析出相的杂质和微量元素，均提高铜的软化温度。在一定范围内随着这些元素含量的增加，铜的软化温度增高（表1-1-4）；但生成氧化物的杂质，大都对铜的软化温度没有明显影响。此外，铜的软化温度与很多工艺因素有关，例如，冷加工率大，冷加工前的退火温度低、冷却慢（此时固溶体的过饱和程度小），冷加工后的退火时间长等，则铜的软化温度低。

杂质对紫铜软化温度(°C)的影响

表 1-1-4

杂质元素	杂 质 含 量, %							
	0.002		0.005		0.01		0.05	
	铜 的 种 类							
	导电用铜	无氧铜	导电用铜	无氧铜	导电用铜	无氧铜	导电用铜	无氧铜
氧	140	140	140	140	140	140	140	140
铁	140	146	140	153	140	155	148	167
锡 <sup>[1]</sup>	180	192	258	282	296	317	336	336
砷	168	168	189	189	205	205	242	242
镍	140	140	140	140	140	140	140	140
铅 <sup>[1]</sup>	146	250	146	270	146	274	146	286
铋 <sup>[1]</sup>	210	260	247	300	275	328	—	—
银	148	148	172	172	207	207	330	330
锡	140	198	140	277	140	315	140	346
硫 <sup>[2]</sup>	181	181	183	183	183	183	—	—

续表 1-1-4

杂质元素	杂质含量, %							
	0.002		0.005		0.01		0.05	
	铜的种类							
	导电用铜	无氧铜	导电用铜	无氧铜	导电用铜	无氧铜	导电用铜	无氧铜
硒〔2〕	222	222	234	234	240	240	250	250
碲〔2〕	212	212	228	228	238	238	250	250
磷	140	258	140	284	140	300	—	—
硅	—	161	—	181	—	198	—	242
钴	—	145	—	152	—	161	—	161
铬	—	152	—	190	—	260	—	320
锌	—	148	—	151	—	152	—	156
镉〔2〕	—	183	—	248	275	309	325	356

- 注: 1. 表中所有试样均经600℃退火后, 冷加工75%, 再在不同温度下退火半小时, 用以观测其退火温度;  
 2. 导电用铜的含氧量为0.02~0.06%纯铜的软化温度为140℃;  
 3. 表中〔1〕表示对导电用铜的软化温度值, 所用试样有部分氧化物形成; 对无氧铜的软化温度值, 所用试样是在700℃以上快冷提高了固溶度;  
 4. 表中〔2〕表示软化温度值较高, 因试样在700℃以上快冷提高了固溶度。

在含氧的导电用铜中, 锑、镉、铁、磷、锡等可与氧化亚铜中的氧作用, 生成它们自身的氧化物, 降低了它们在铜中的固溶度, 从而减弱甚至完全消除了它们对铜的软化温度的影响。砷含量在0.05%以下时, 与铜中正常含量的氧无明显作用; 硒、碲也与砷相似, 因此, 它们均提高导电用含氧铜的软化温度。镍虽与氧化亚铜作用生成氧化镍, 但对铜的软化温度影响很小。

在无氧铜中, 杂质所提高的软化温度, 通常比在含氧铜中要大; 因为在无氧铜中, 杂质不形成氧化物。银、磷、锑、镉、锡、铬等提高无氧铜的软化温度最多, 砷、硒、碲等次之, 硫、铁、镍、钴、锌等最少。

铜的软化温度增值, 不是单个元素影响的算术和, 而只是比具有最大影响的元素所提高的软化温度略高一点而已。

杂质对铜在退火时的晶粒长大有很大影响。高纯铜的晶粒随退火温度的升高而迅速长大, 并且晶粒尺寸也很不均匀。导电用铜则由于有氧化亚铜存在, 在通常的退火温度范围内, 可有效地抑制晶粒长大。脱氧铜和无氧铜虽然与高纯铜有类似之处, 但也由于有微量杂质析出物的存在, 仍可有效地控制晶粒长大, 并获得均匀的晶粒尺寸。不管杂质含量如何, 在生产中控制加工率、退火温度和时间, 是控制再结晶晶粒长大的基本条件。

### 三、杂质及微量元素对铜的压力加工性能的影响

固溶的杂质及微量元素, 实际不影响铜的冷、热压力加工性能。很少固溶或几乎不固溶于铜的杂质及微量元素, 则视其所生过剩相的情况不同, 对铜的压力加工性能将有着不同的影响。例如, 氧、硫、硒、碲在铜中分别形成 $\text{Cu}_2\text{O}$ 、 $\text{Cu}_2\text{S}$ 、 $\text{Cu}_2\text{Se}$ 、 $\text{Cu}_2\text{Te}$ 等脆性化合物, 降低铜的塑性; 铅、铋与铜生成易熔共晶, 热轧时易裂; 脆性的铋呈薄层分布在铜的晶界上, 还使铜产生冷脆性。

为提高铜的高温塑性, 防止热脆性, 可根据相图选择那些与有害杂质形成难熔化合物(熔点高于铜的熔点或热轧温度)的元素加入铜内, 其加入量可根据该难熔化合物的分子

式和已知有害杂质含量大体算出。锂、钙、铈或混合稀土金属、锆、铀等均可消除铅、铋等杂质的有害作用。它们所生成化合物的分子式和熔点见表1-1-5。

微量元素与铅、铋形成的化合物及熔点

表 1-1-5

化合物	熔点, ℃	化合物	熔点, ℃	化合物	熔点, ℃	化合物	熔点, ℃
Ca <sub>2</sub> Pb	1001.2	CePb <sub>3</sub>	1171.6	Bi <sub>3</sub> Ce	1632.4	BixZry	2203.7
Ce <sub>2</sub> Pb	1201.7	ZrxPby	2003.2	BiCe <sub>3</sub>	1402		
CePb	1161.6	UPb <sub>3</sub>	1221.7	Bi <sub>2</sub> Ca	929		
CePb <sub>2</sub>	1141.5	BiCe	1527.2	BiLi <sub>3</sub>	1147.6		

提高铜的高温塑性的另一方法是细化铜锭晶粒，相对降低有害杂质在晶界上的浓度。

铜中加入微量钛、锆、铬、硼等元素，都能细化晶粒，抑制柱状晶的发展，并减小铜的高温脆性。

铜的熔铸、压力加工和试验条件也将引起铜的成分或组织变化，对铜的高温塑性也有影响。

铜在低温具有良好的塑性，但随着温度的升高，往往出现一脆性区（见图1-1-5和表1-1-6），热压力加工常需在高于此脆性区的温度下进行。脆性区与杂质的性质、含量、分布、固溶度变化有关。如铅、铋呈易熔共晶，中温变成液态削弱晶间联结，使铜热脆。高温时，铅、铋又固溶于铜，使塑性又有升高。

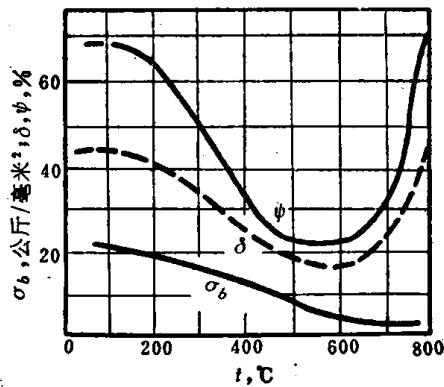


图 1-1-5 导电铜线的高温性能

铜的断面收缩率与温度的关系

表 1-1-6

序号	铜的成分, %	在下列温度 (℃) 下的断面收缩率, ψ, %						断面收缩率随温度上升的变化特点
		20	100	350	400	500	700	
1	无氧铜	67	75	26	34	25	32	有峰值地大量下降
2	99.90Cu, 0.06O <sub>2</sub>	70	—	—	29	20	33	大量下降后又回升
3	99.96Cu	90	92	—	70	84	98	少量下降后又大量升高
4	99.94Cu, 0.01O <sub>2</sub>	95	95	—	55	37	35	大量下降
5	99.93Cu, 0.06O <sub>2</sub>	65	74	—	65	80	94	有峰值地变化

注：1 是铸造的；2、3、4、5 是变形及消除应力退火的。

有些研究工作表明，铜在300~600℃呈脆性区是杂质氢引起的。含氧少的铜常含有一定量的氢，在上述温度范围内，试样在拉伸应力作用下，氢从固溶体中析出，并在铜中不致密处（首先是在晶界上）聚集起来，处于高压气体状态，使铜开裂。随着温度的升高，氢又部分或全部固溶于铜，又使铜的塑性增高。

实践证明：采用铜豆少（含氢也少）的电解铜，可提高铜锭和铜材的高温塑性。用磷脱氧的铜锭在400~600℃有明显的脆性区，而用0.03%硅加0.01%镁脱氧的，则没有明显脆性区。因为磷与氢相似，为表面活性元素，易吸附在铜的晶界上，引起高温脆性。

半连续铸造的紫铜锭，在横向热轧开坯时，裂的较多，而在纵向热轧开坯时，几乎不裂。说明铜锭的塑性，很明显与柱状晶的方向有关。

经过多次压力加工的铜材，其高温塑性比铜锭要好得多，并且随着变形量的增加，脆

性区向低温方向移动；同时，塑性下降的程度也减少，甚至变得完全看不出脆性区。这可能是因为：多次变形增加了晶粒数目和晶界总的面积，更主要的是破坏了铸造组织，压合了晶界的显微疏松等缺陷造成的。

四、杂质及微量元素各论

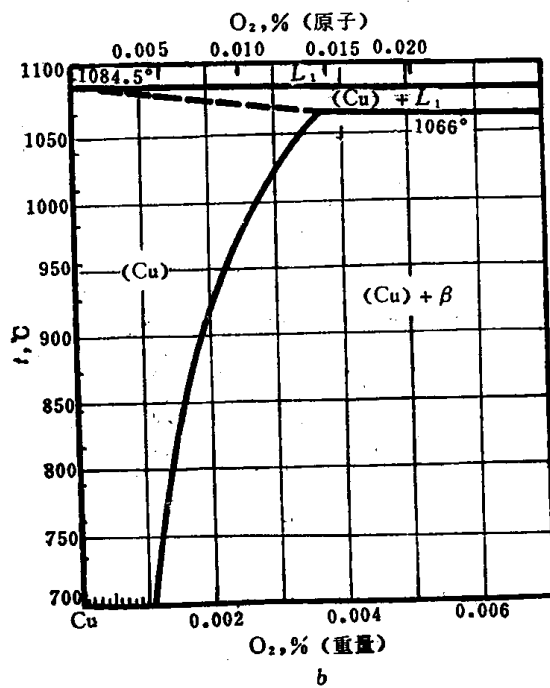
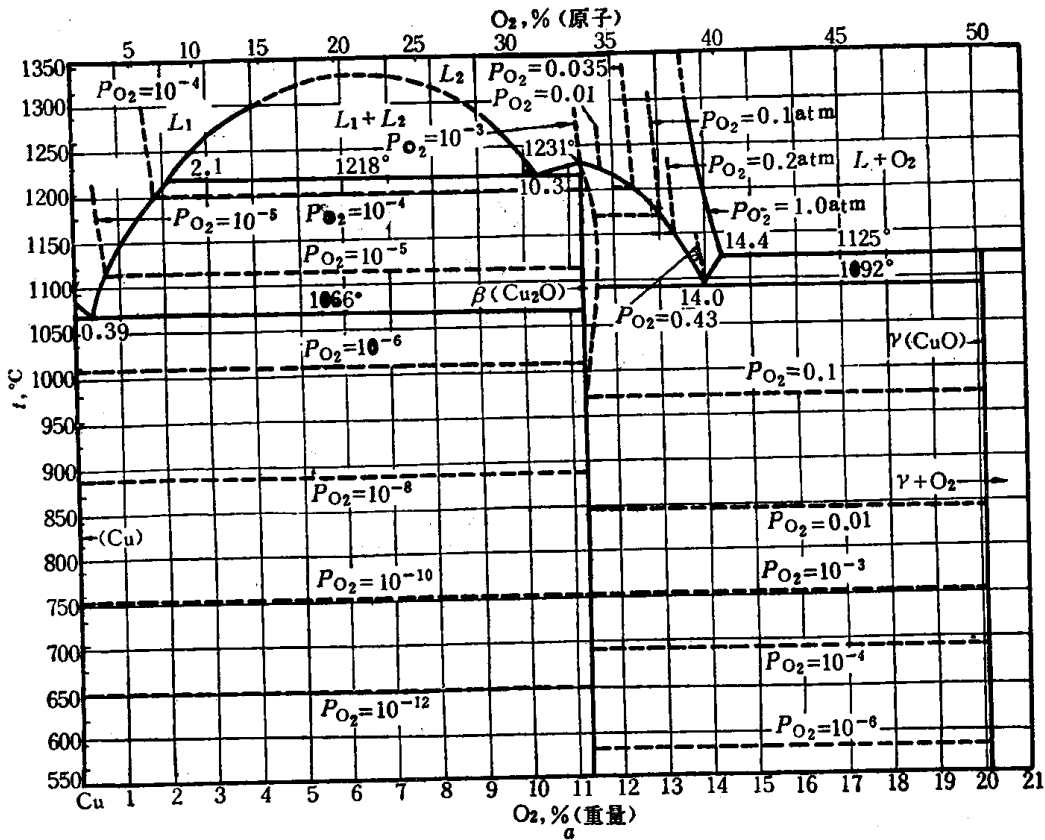


图 1-1-6 Cu-O<sub>2</sub>相图

这里分别叙述各主要杂质及微量元素对铜的性能影响，并结合微量元素的作用，介绍某些特种铜的性能和用途。

**氧** 很少固溶于铜。从铜-氧相图（见图1-1-6）可见，含氧铜冷凝时，氧呈共晶体（ $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$ ）析出，分布在铜的晶界上。亚共晶铜中的含氧量与共晶量成正比，可在显微镜下与标准图片比较来精确测定铜中的含氧量（见GB 471—64）。

铸态含氧铜的组织见图1-1-7，当含氧量极低时，只看到铜的晶粒（图1-1-7 a）；随着含氧量的增高，则出现含 $\text{Cu}_2\text{O}$ 的亚共晶、共晶或过共晶组织（分别见图1-1-7 b、c、d）。氧对铜的机械、物理性能影响见表1-1-7及图1-1-8。氧降低铜的焊接、电镀金属等工艺性能。

氧和其它杂质共存时，对铜的性能有复杂的影响（见图1-1-9，表1-1-8至表1-1-12）。微量氧可氧化高纯铜中固溶的微量杂质（如铁、锡、磷等），使固溶于铜的杂质量减少，提高铜的导电性（分别见图1-1-9、表1-1-7及表1-1-8）。但当固溶杂质含量增高时，微量氧将不足以减弱其对铜导电性的影响（表1-1-9、表1-1-11）。氧能部分地减弱铋、镉对铜的导电性的影响，但不改变硫、硒、碲、铋等对铜的导电性的影响（表1-1-8、表1-1-12）。不论铜中是否有氧存在，砷总是严重降低铜的导电性（表1-1-8、1-1-10、1-1-11）。

氧对铜的性能影响

表 1-1-7

铜材状态	氧含量 %	抗拉强度 $\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	伸长率 $\delta$ %	断面收缩率 $\psi$ %	导电率 g %IACS	比重 $\gamma$	疲劳强度 $\sigma_N$ $N = 5 \times 10^7$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	备 注
700℃退火 30分钟	0.016	22.8	54	77	101.4	8.91	7.7	由表可知：氧稍微提高铜的强度，但降低铜的塑性和疲劳极限。氧对铜的导电率影响不大
	0.040	22.5	50	72	101.6	8.90	9.4	
	0.060	22.8	56	70	101.5	8.90	9.1	
	0.090	23.2	53	65	100.6	8.88	8.4	
	0.170	24.2	49	57	99.0	8.84	7.7	
	0.360	26.0	55	39	96.2	8.76	7.7	
冷拉态	0.036	26.3	30	73	99.6	—	13.0	
	0.049	26.3	29	68	98.9	—	12.3	
	0.094	26.7	27	63	97.9	—	13.4	
	0.220	28.8	27	49	94.6	—	12.0	

可采用磷、钙、硅、锂、铍、铝、镁、锌、钠、锶、硼等元素作为脱氧剂，它们在铜中的允许残留量，应视铜的用途以及该元素对铜性能影响的大小而定。磷是最常用的脱氧剂，含磷达0.1%也不致降低铜的机械性能，但却严重损害导电性。对于高导电铜来说，残余含磷量应低于0.001%。脱氧铜在浇铸过程中，如不用保护气氛，仍可吸收0.01%氧。

某些紫铜品种还有意识地保留少量的氧，因为少量氧对铜的导电性和机械性能影响甚微，而且可以减轻或消除某些微量杂质的有害作用，这是由于 $\text{Cu}_2\text{O}$ 与铋、镉、砷等杂质起反应，形成高熔点的、分布于晶粒内部的球状质点，从而防止晶界上出现脆性薄膜的缘故。

氧和其它杂质共存时对铜的导电率影响

表 1-1-8

杂 质		氧 含 量, %	冷拉铜线的导电率 g, %IACS	备 注
名 称	含 量, %			
铁	0.00007	无	100.0	氧使铁呈 $Fe_3O_4$ 析出, 提高铜的导电率
	0.05	无	75.3	
	0.00007	铜在850℃氧扩散饱和	102.2	
	0.05	同上	99.9	
镍	0.0007	无	100.3	少量氧不干扰镍对铜导电率的影响
	0.05	无	96.3	
	0.0007	0.018	100.15	
	0.05	0.017	96.4	
磷	0.0008	无	99.55	氧可氧化固溶于铜的磷, 提高铜的导电率
	0.020	无	88.85	
	0.0008	铜在850℃氧扩散饱和	100.0	
	0.020	同上	100.2	
锡	0.005	无	99.7	氧与锡生成 $SnO_2$ , 使固溶的锡减少, 提高铜的导电率
	0.050	无	99.55	
	0.005	0.023	100.15	
	0.050	0.024	100.15	
镉	0.044	无	99.25	镉很少降低铜的导电率, 氧可部分地中和镉对铜导电率的影响
	0.164	无	97.6	
	0.050	0.017	99.75	
	0.168	0.017	98.45	
硫	0.005	无	99.9	硫、硒、碲降低铜的导电率不多, 且不受氧的干扰
	0.010	无	99.8	
	0.005	铜在850℃氧扩散饱和	99.8	
	0.010	同上	99.95	
硒	0.005	无	99.6	
	0.05	无	99.3	
	0.005	0.037	99.7	
	0.05	0.035	99.35	
碲	0.005	无	99.9	
	0.05	无	96.65	
	0.005	0.030	99.85	
	0.05	0.025	99.6	
砷	0.0006	无	99.9	不管氧的存在与否, 砷总是严重降低铜的导电率
	0.0465	无	87.8	
	0.0005	0.026	99.85	
	0.042	0.029	87.8	
铋	0.0194	无	96.9	氧能部分地减弱铋对铜导电率的影响
	0.060	无	91.0	
	0.0194	0.13	97.85	
	0.062	0.028	91.3	



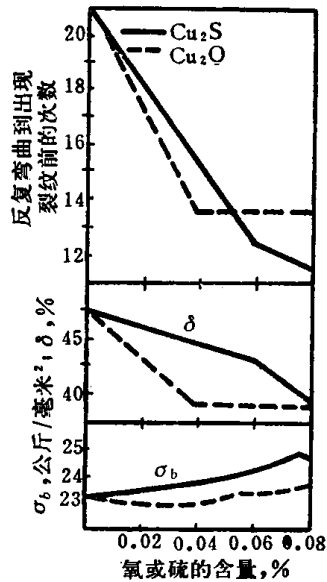


图 1-1-8 氧和硫对铜的性能影响

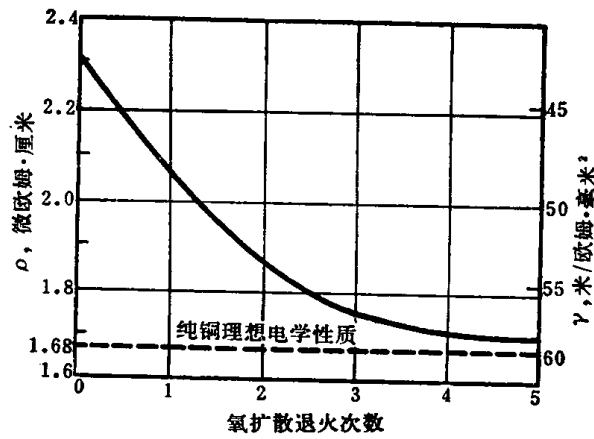


图 1-1-9 在氧介质中扩散退火次数对Cu-0.065% Fe-0.012%P合金导电性的影响

氧和铁共存时对铜 (700°C, 退火30分钟) 的性能的影响

表 1-1-9

氧含量 %	铁含量 %	抗拉强度 $\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	伸长率 $\delta$ %	断面收缩率 $\psi$ %	导电率 g %IACS	比重 $\gamma$	疲劳强度 $\frac{\sigma_N}{N=2 \times 10^7}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	备 注
0.014	0.06	22.8	57	73	101	8.90	9.8	氧和铁同时存在而含量在本表所述范围内时, 铜的导电率和伸长率均显著降低, 但强度和疲劳强度则显著升高
0.003	0.20	22.5	60	73	54.1	8.92	9.4	
0.004	0.40	23.5	60	80	40.8	8.92	10.1	
0.008	0.73	26.3	52	80	42.0	8.91	10.1	
0.005	0.96	25.3	45	82	38.9	8.91	10.5	
0.004	1.38	30.2	30	79	37.7	8.91	10.8	
0.007	1.80	31.2	29	79	37.7	8.91	11.2	
0.008	2.09	34.8	34	79	37.9	8.91	14.1	

氧和砷共存时对铜 (700°C, 退火30分钟) 的性能的影响

表 1-1-10

氧含量 %	砷含量 %	铁含量 %	抗拉强度 $\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	伸长率 $\delta$ %	断面收缩率 $\psi$ %	导电率 g %IACS	比重 $\gamma$	疲劳强度 $\frac{\sigma_N}{N=2 \times 10^7}$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	备 注
0.016	0.053	0.008	22.1	57	72	85.5	8.91	9.8	氧和砷共存, 对铜的机械性能无明显影响, 但显著降低铜的导电率
0.005	0.093	痕迹	22.5	57	70	76.9	8.98	10.1	
0.003	0.36	痕迹	22.8	60	79	45.3	8.92	9.5	
0.009	0.60	痕迹	23.5	55	62	33.7	8.85	10.1	
0.013	0.86	痕迹	23.9	56	66	25.6	8.86	10.5	
0.006	1.04	痕迹	23.9	59	79	22.5	8.91	10.8	
0.11	0.09	—	—	—	58	73.9	8.87	10.8	
0.039	0.09	—	22.8	62	70	75.3	8.90	9.5	
0.04	0.24	—	23.2	57	71	55.1	8.89	10.8	
0.06	0.25	—	22.8	58	67	54.8	8.88	10.5	
0.07	0.30	—	23.2	55	66	49.9	8.88	10.5	
0.058	0.34	—	23.5	56	64	46.4	8.88	10.2	
0.071	0.44	—	23.2	59	67	40.8	8.88	10.8	
0.034	0.45	—	23.9	62	72	37.9	8.90	11.2	
0.05	0.93	—	24.9	61	72	24.0	8.90	10.8	
0.005	1.40	—	—	—	67	19.2	8.87	10.8	
0.006	2.02	—	25.6	59	64	14.2	8.86	12.0	