

铜知识系列小丛书

铜——金属材料中的佼佼者

前 言

本书是由国际铜业协会(中国)编写出版的科普性读物。它通过介绍铜的各种优异特性,强调了铜在导电、导热、机械加工、耐腐蚀、杀菌等方面的突出作用,展示了铜与其它材料相比的明显优势,从而进一步阐述了使用铜及其合金所带来的综合效益。

本书力求用通俗易懂的语言,将有关方面的最新研究成果介绍给读者。本书的内容是在参考了国内外的最新资料,并结合国际铜业协会多年来积累的一些权威性资料编写而成的,相信广大读者会从中受益。

国际铜业协会是世界上最主要的推广和促进铜使用的非赢利性国际组织。现有正式会员二十九个,代表着世界精铜产量的75%,其协作成员都是世界上最大的铜和铜合金加工企业。国际铜业协会负责制定方针政策,长远规划和资金分配方案以使得促进铜使用项目在世界范围内开展。除了在美国纽约的总部外,国际铜业协会在布鲁塞尔、圣地亚哥、北京、新加坡、孟买和上海设有地区代表处。国际铜业协会的项目是通过地区代表处和在美国、英国、德国、法国、日本、加拿大、澳大利亚等国家和地区的21个独立的铜发展中心以及一些生产厂家来具体实施的。项目的重点集中在主要的铜最终用户上:用于电力和信息传输的电线电缆,用于供水的管道系统,用于建筑内外设计和装修的产品以及工业应用和汽车应用等。国际铜业协会支持有关铜对环境 and 人类健康影响的科学研究。国际铜业协会向各国的政府部门提供制定有关铜和铜合金的政策及法规的相关依据和建议。

国际铜业协会(中国)在北京和上海设有代表处。在电能效益、建筑导线、铜水管的应用、新型汽车散热器等方面进行了大量的工作,并取得了相关部门的支持和参与。目前,这些项目正在进一步实施中。

国际铜业协会(中国)愿同各界人士合作,更好地为铜工业和整个社会发展作出贡献。

铜——金属材料中的佼佼者

1. 一个熟悉而又奇妙的金属——铜

铜就在你身边

铜是人类最早认识和广泛使用的金属。它不但为人类灿烂的古



代文明立下了汗马功劳，而且也是辉煌的现代文明的重要物质基础。现在，只要你一摁动电门、打开电视机、启动计算机、踏上电车、开动电机和机器，……铜就忠实地在为您服务；通过电线，铜给你带来光明、

温暖、信息和无限的欢乐；微量铜还是你身体健康必不可少的微量元素……，铜无时无刻不在你身边。我们对铜的认识越深，就能更好地驾驭它，充分发挥它的作用。

众多材料中选择铜

随着科学技术和生产的发展，人们可以选择利用的材料，日新月异、品种繁多。常用的工程材料有金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料三大类。

人们从大量切身的生产和生活经验中，形成了这样一个深刻的概念：金属与其它材料相比，最大的优点是导电、导热、有良好的

延展性和绚丽的金属光泽；缺点是容易生锈，不耐腐蚀，人们为保护它而煞费苦心。本书的主人公——铜，则集金属的众多长处于一身，而没有上述缺点，它不愧为工程材料，特别是金属材料中的佼佼者。下面将逐一介绍它的主要性能。

2. 卓越的导电和导热性

导电性和电阻率

金属中带负电的自由电子，在外加电场的作用下，沿一定方向流动而产生电流(I)。这些电子在金属中运动时，与不停振动着的原子相碰撞而减速，从而造成电流的阻力——电阻(R)。电阻越小，导电性能就越好。电流与水流相似。水在管子中流动要受到阻力。管子越细、越长，阻力就越大。电阻也是如此。同样材料的导体，它的截面尺寸(S)越小、长度(L)越长，电阻就越大。因此，各种材料的导电能力和电阻大小，就必须在相同的尺寸下进行对比。通常规定：电流通过一平方厘米截面和一厘米长的导体时，它所遇到的电阻（以微欧姆为单位），为该导体的电阻率(ρ)。电阻率是反映材料导电性能的指标。材料的导电性好，电阻率就低。并且可以通过下面的公式计算出任何尺寸下该导体的电阻数值：



$$R = \rho \times L/S$$

铜是被广泛应用的最佳导电体

在所有金属中，铜的导电性仅略逊于银。从表1可以看到，铜的电阻率略高于银外，是所有金属中最低的。由于银比较昂贵，因而铜是被广泛应用的最佳导电体。

表1 一些常见金属的电阻率(微欧·厘米)和导热率(瓦特/厘米·度)

金属	银(Ag)	铜(Cu)	金(Au)	铝(Al)	锌(Zn)	铁(Fe)	锡(Sn)	铅(Pb)
电阻率	1.58	1.68	2.21	2.66	5.95	9.7	11.3	20.7
导热率	4.15	3.93	3.12	2.26	1.13	0.94	0.66	0.35

注：电阻率在18℃下测定，导热率在0℃下测定。

铜的导电性会受到一些因素的影响，主要有：

- 铜中含有杂质或加入合金元素后，会使铜的导电性明显降低。因此，在导电体上应用的大都是纯铜，纯度（即含铜量）通常大于99.9%，纯度越高导电性越好。
- 铜受冷加工变形后，电阻率升高约2—6%。加热后消除加工组织，称再结晶退火，其高导电性得以恢复。
- 铜随温度升高，电阻率增加。因此要求在一定温度下测量和比较。

为了方便工程应用，国际上把退火态纯铜（20℃时电阻率为1.7241微欧·厘米）的导电性规定为100%。铜的合金或者其它材料与它对比进行标定，称为IACS值。因为铜的导电性对微量杂质很敏感，所以在生产上也可以用IACS值作为铜纯度的一个指标。高纯铜的IACS值可达101.5%。

铜的电阻率(ρ)低，同样尺寸的器件对应电阻值(R)低，在一定电压(V)作用下，就可以产生更大的工作电流(I)。这对于发电和利用电来作功十分有利。大的电流可以产生大的磁场，获得大的磁力和高功率的电机等等。



电动机用铜做绕组

和铜相比，高纯铝（99.996%）和工业纯铝（99.5%）的导电性 IACS 值，分别为 64.94% 和 59%。也就是说，在电气工程应用中，铜材的导电性比铝材高 35% 以上。

电的利用离不开铜

铜优异的导电性能，对电的利用至关重要，可以带来如下的巨大能效：

- 可承载大的工作电流

根据电学中最基本的欧姆定律：

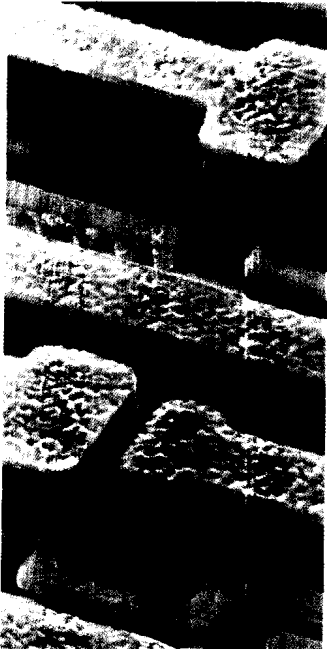
$$I = V/R$$

- 节能降耗、减少温升

电流(I)通过导体时，由于电阻(R)而发热，所引起的电能损耗(W)由下式确定：

$$W = I^2R$$

铜的电阻率低，不但可以使电在传输过程中减少损失，节能降耗；而且使导体及其周围介质的温升减少，工作更安全可靠。



半导体器件的局部，被放大 50,000 倍的立体图，显示其互补型金属氧化物半导体 CMOS75 储存器中，在钨（蓝色）局部互联的上面，再用铜（红色）进行互联

• 减小自身和器件尺寸

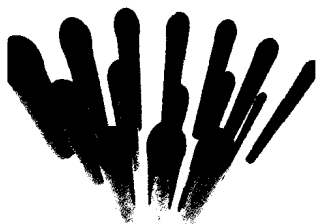
前面已经谈到了导体的电阻与电阻率及导体尺寸之间的关系。在相同的电阻值和长度的设计要求下,铜的电阻率低,导体的截面尺寸就可以减小。这样既可以节省用材,还可以简化电缆结构、方便安装。

由于铜的上述优点,它不但在制造电线、电缆、发电机、电动机、变压器等传统产品上,而且在大规模集成电路及各种电子元器件要求小型化、密集化的新产品新技术中,得到了广泛应用,有其广阔的发展前景。

铜也是最好的实用导热体

金属的导热是通过自由电子之间以及它们与离子的碰撞而传递能量(热量)的。所以金属的导热性与导电性有密切关系。

材料的导热性用导热率(λ)来表征。它是截面为一平方厘米、长度为一厘米的物体,当两端存在 1°C 的温差时,每秒钟传递的热量(瓦特)。如表1所示,导电性越好电阻率越低的金属,它的导热率相应也越高。铜仅次于银,是金属中最佳的实用导热体。而且它在水等介质中抗腐蚀,无需特殊保护。用铜来制造各种散热器、热交换器和冷凝器上的散热管和散热片,散热效率高、经久耐用。



应用于空调机的各种铜散热管

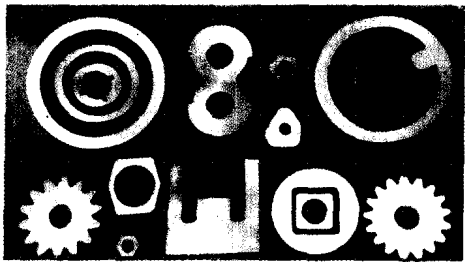
3. 优异的使用性能和工艺性能

优良的使用性能

纯铜主要应用在导电和导热的场合。为满足更广泛的性能要求,已开发出多种铜合金。当在铜中加入一种或一种以上其它元素

(称为合金元素)而形成铜合金时,可以显著地提高除导电和导热以外的许多使用性能和工艺性能。常用的合金元素有锌、镍、锡、铝、铍、硅、铅等,形成以某一合金元素为主的许多铜基合金系列,包括黄铜(以锌为主),白铜(以镍为主)和各种类型的青铜(如:锡青铜、铝青铜、铍青铜、硅青铜等)。这些合金有独特的优良机械性能,可根据不同的使用要求加以选用。它们的主要特点有:

- **强度和硬度高** 可以制成坚固可靠的结构件和兵器。各类高强度铜合金已在各种机械制造和建筑结构上得到了广泛应用。如用铍青铜制成的工具,使用时不迸火星,适于在采矿和采油等危险的环境下工作。
- **弹性高而稳定** 制成弹簧可获得大的弹力,抗疲劳性能好,工作起来稳定可靠。许多青铜,如锡青铜、钛铜,尤其是铍青铜,是制造电子簧片和波纹管等弹性元件的重要材料。



形状复杂、尺寸精确
的仪表零件

- **韧性好** 使用时安全可靠。一般材料很难兼顾强度和韧性两个方面。或者强度高而韧性差,容易发生危险的脆性断裂;或者柔韧有余而强度不足,难以承重荷。铜和铜合金的特点是,在具有较高的强度和硬度的同时,保持了较好的韧性,这是十分难能可贵的。

还应指出的是,铜和铜合金具有能在极低温度下,例如深冷到液氮(-196°C)、液氢(-253°C)甚至液氦(-269°C)的温度下,仍保持良好的韧性,是低温工程中不可缺少的材料。

• **耐磨损、抗卡咬** 可以延长受磨擦零件的使用寿命。在齿轮、泵、阀、汽缸以及各种磨擦件上得到了广泛应用。用来制造轴承和轴瓦，耐磨而且可以防止由于过度磨损而粘结卡住。



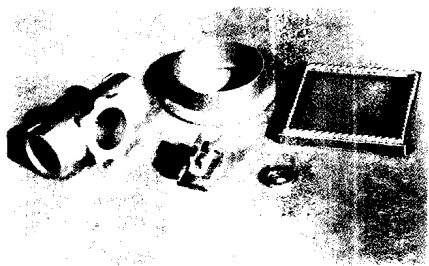
飞机发动机用
黄铜精密轴承

满意的工艺性能

任何零部件都需要经历一定的工艺过程才能生产出来，因此，在各个加工工序中材料的工艺性能是决定产品产量、质量和成本的一个关键因素。铜和铜合金除了具有上述优良的使用性能外，还具备满意的工艺性能，按照通常工艺过程的顺序表现为：

• 铸造性能好

熔融的铜和铜合金通过连续铸造生产出各种形状和尺寸的坯料，供进一步塑性加工；或者采用各种浇铸技术，



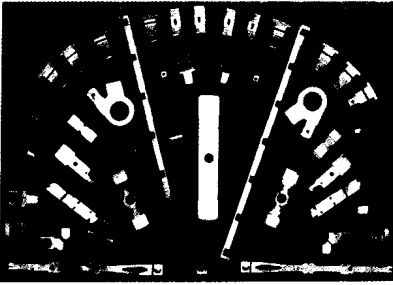
用压力模铸生产出来的
黄铜零件。薄壁、尺
寸精确、花纹精细

如：砂型铸造、模铸、离心铸造、连续铸造和精密铸造等方法直接生产出接近工件最终形状的产品。由于铜和铜合金的铸造性能好，可以铸造出尺寸准确、厚度很薄、花纹精细

以及形状十分复杂的铸件。有的只需简单的表面清理和修饰就可使用。

- **塑性加工性能优良**

可以用连续铸造生产出来的坯料，通过各种有效的冷、热加工方法，包括：轧制、锻造、挤压、拉拔、冲压、弯折等技术，生产出各种形状和规格尺寸的半成品。由于铜和铜合金有极佳的塑性，可以更多地采用冷加工成型的方法，不但形状、尺寸精确，而且节能。大量使用的铜丝就是通过多次深度冷拔生产出来的。制成0.001毫米的丝和箔对铜来说并不困难。铜箔不但可以轧制出来，还可以用电解沉积的方法生产出来。



用轧制的铜合金带材生产的各种电接头

- **切削加工性能最好**

在自动生产线上大量生产通用零件时，需要材料有良好的可切削性能。黄铜中加入少量的铅，在合金中形成游离的细小颗粒，切削过程中，对刀具起润滑作用，而且切屑易破碎而不缠绕刀具。这样不但能进行高速切削，提高生产率，而且可以减少昂贵刀具的损耗，从而降低零件的成本。图1中比较了目前常用金属工程材料的切削性能，易切削黄铜的性能高居榜首。目前在汽车等工业领域内，用它来制造大批量生产的机加工零件。

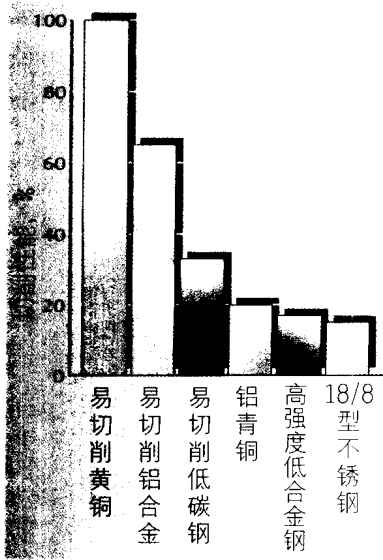


图1 各种金属工程材料切削性能的比较

- 焊接方便易行

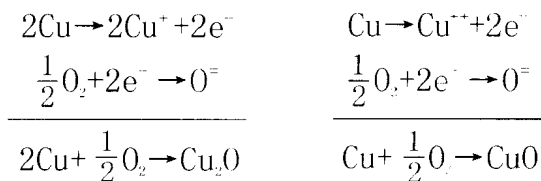
铜和铜合金可以用各种常用的焊接技术，如：电弧焊、电阻焊、感应焊、磨擦焊、冷压焊、硬钎焊、银焊、软焊等方法，很方便地加以连接；可以根据使用性能的要求和施工条件，灵活地加以选择，达到操作方便、经济、安全和连接可靠的目的。

4. 良好的耐蚀性和神奇的生化功能

铜的耐蚀性很好

金属材料在使用过程中，会受到周围环境的侵蚀而发生损坏。这种过程的本质是金属原子失去电子变成离子而形成化合物(腐蚀

产物)的过程。以铜受氧化为例,如下式所示:



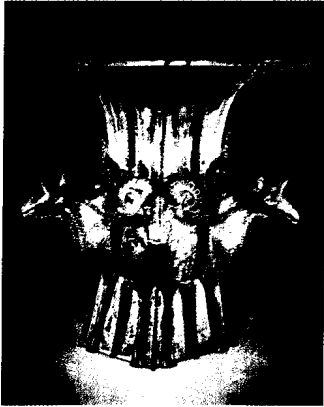
铜原子失去电子成为正离子,周围氧气(O_2)中的氧原子得到电子成为负离子,两者结合生成氧化铜。每个铜原子失去一个电子(Cu^+)生成的是氧化亚铜(Cu_2O),失去两个电子(Cu^{++})就生成氧化铜。铜在潮湿的大气中受腐蚀,其反应如同在电解质中进行,就象干电池中的锌溶解到硫酸中形成硫酸锌(ZnSO_4)那样,会形成电势引起电流,称为电化学反应或电化学腐蚀。金属原子越容易失去电子,就越活泼。根据实验测定,按常见金属的化学(电学)活泼性由大到小的顺序(即以 25°C 时的标准电位由负到正的顺序)排列如下:

钾—钠—钙—镁—铝—钛—锰—锌—铬—铁—
 钴—镍—锡—铅—氢—铜—汞—银—铂—金

从这个顺序中可以看出,铜在周期表上和同族的金和银一样,属于不活泼的金属。

金属与周围介质反应发生腐蚀是一个比较复杂的过程。它不但取决于金属和介质的活泼性,而且与所形成的反应产物的性质密切相关。如果这些反应产物能在金属表面上形成一层结构致密、与基体粘结紧密并且不被介质溶解的保护膜,把金属与介质隔开,就能阻止腐蚀过程;反之,如果不能形成这种稳定的保护膜,由于反应不断进行,金属就会发生腐蚀。铝和钛属于前者,它们虽然活泼,但是能形成致密的氧化膜,可以减缓或防止在氧化性介质中的腐蚀。然而一般的钢铁则属于后者,在它上面形成的氧化膜,疏松易剥落,很容易受腐蚀。不锈钢中加入大量的铬、镍以及铜等元素后,由于这些元素形成的氧化膜有保护作用而耐蚀。铜的显著优点是,它本身既不活泼,又能在表面形成保护膜。保护膜不怕受损伤,有再生

的自愈能力。因而，耐腐蚀性能极强。铜制品可以长期暴露在大气中、埋藏在土壤里、工作在海洋中而不锈蚀，经久耐用。埋在地下



几千年的许多出土铜器，经受了历史的考验，仍保存良好。在铜中添加锡、铝、镍等元素，不但可以提高强度，而且可以增强它的耐蚀性。例如，海轮的螺旋桨大多用铝青铜铸成；许多复杂成分的白铜和黄铜广泛应用于制造与海水接触的结构件、零部件和管道系统等。此外，铜和铜合金可以抵御许多化学物质，如：盐酸、各种有机酸、除氮以外的各种碱以及非氧化性的有机化合物如油类、酚、醇等的腐蚀，在石化

工业中得到广泛应用。

铜有杀菌和抗生物污损的作用

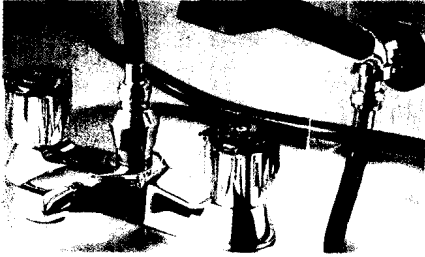
• 防止海生物污损

一般的材料，如钢铁、木材、玻璃等，与海水接触，很容易在表面上滋生和附着各种各样的生物群。肉眼可见的有藻类、贝类和蠕虫等。它们生长在船壳上使船体变重、船速降低、腐蚀加速，返航后要经常清除，费工、费时、费力；生长在管道内壁，则会严重影响流速和热交换效率，直至造成堵塞而报废；生长在采油、采气平台等水下结构的表面上，不但促进构件锈蚀，而且会增大海浪拖力，导致过早的损坏，而引发事故。

在海水环境中使用铜和铜合金，或采用表面包覆铜或涂刷含铜油漆的办法，由于溶入水中的铜离子有杀灭细菌和微生物的作用，从而可以防止海生物的污损，效果很明显。例如：早期在英国的舰船上使用的含1%锡的黄铜，以抗海水腐蚀和生物污损而闻名，获得了“海军黄铜”的美称。

• 抑制饮水中和公共用具上的病菌

许多病菌如大肠杆菌、肺炎病菌等，容易在水中滋生，引起疾病流行。在供水系统中使用铜管件，溶入水中的微量铜离子有显著的杀菌、抑菌作用，可防止这种病菌对城市供水（自来水）的二次污染，铜日益成为饮用水系统中的首选材料。此外，医院或公共场合内的扶栏、门把等人们经常接触的构件，使用铜制品，有利于防止流行病的传播。



• 消除农牧业中的病虫害

硫酸铜等铜的化合物是有效的杀菌剂、灭虫剂、防腐剂 and 保鲜剂。已知它可以防治百余种农作物（包括：果树、谷物、豆类、蔬菜和经济作物等）上发生的300多种真菌病害；可以用于农产品的防霉储存和保鲜包装；可以消毒栏圈，防治牛羊烂脚；可以消除河塘的绿藻污染以及杀灭传播肝血吸虫病的蛭蚴和螺等软体动物。

铜的化合物中应用最多的是硫酸铜，它往往也是生产其它铜化合物的原料。目前世界上硫酸铜的年产量近20万吨，其中3/4用于农业，主要用作杀菌剂。

• 建筑业和纺织业中的防腐剂

铜的油基和水基化合物是木材的防腐剂。还可以用铜的化合物作添加剂，生产出耐蚀帆布等织物以及抗腐纸袋等。

• 微量铜是人体健康的重要营养素

铜与人体内的有机化合物形成具有生物活性的物质如各种酶和蛋白质。机体的生物转化、电子传递、氧化还原、组织呼吸都离不开铜。人机体内许多关键的酶，需要铜的参与和活化，对机体的代谢过程产生作用，促进人体的许多功能，从而对人体的血液、皮肤、头发、骨骼以及大脑、心脏、肝脏、中枢神经和免疫系统的发育和功能有重要影响。



人们主要从膳食中摄取铜。缺铜有碍身体健康，引起婴儿和儿童发育不良。最近还发现缺铜是引发冠心病的一个重要因素。世界卫生组织（WHO）推荐成人每天每公斤体重应摄入0.03毫克

铜，即一位60公斤体重的成年人每天应至少摄入1.6毫克铜（10片全麦面包中约含1毫克铜）。孕妇应加倍，婴儿和儿童也应加量。铜对人体的潜在毒性很少，防止缺铜是一个普遍值得注意的问题。长期以来已发展了一些含铜的药剂，例如用来治疗精神病和肺病以及溃疡和皮肤病等。此外，含铜药剂有消炎和治疗关节炎的作用。人们的经验，佩戴铜镯可以治疗关节炎，就是一个证明。

• 铜是农牧业稳产、高产的一个重要保证

微量铜也是农作物和畜禽生长，实现正常新陈代谢的重



微量铜对玉米生长的影响。左边是在贫铜土壤上生长的玉米，发育不良。右边是随着补充铜量的增加，玉米的生长逐渐恢复正常。

要营养素。缺铜会引起减产和农产品质量降低,严重时会造成颗粒无收、畜禽死亡。由于世界上某些地区土壤中原来就贫铜;再加上农牧业上采用先进技术和管理方法,强化生产,过量地消耗了土壤中的铜,从而使缺铜日益成为当前农牧业生产中一个世界性的问题,需要重视。应根据情况,及时采取相应的补铜措施予以解决。将铜的化合物施加在农田里以改良土壤,或者喷洒在叶面上让作物吸收;对于畜禽,按要求将铜的化合物掺入饲料,或者直接注入患贫铜症的牲畜体内等等,都是一些有效的措施。



此外,猪和肉鸡喜爱吃含铜高的饲料。多量铜的摄入,有助于食物转化,促进其生长。在猪和鸡的饲料中加入高至0.1%的硫酸铜,可以获得显著效果。例如:对于小猪的作用特别明显,可以使每天的体重平均增长高达9%左右。

5. 美丽的外观、多变的色彩

绚丽的金属色泽

铜和金、银一样,是少数几个具有美观色泽的金属。铜的合金还具有多彩的颜色,通常以其色彩而命名各类合金。

• 紫铜

铜在新鲜状态下呈橙红色。在常温和大气中轻微氧化后呈紫红色,因而纯铜俗称紫铜。

• 黄铜

铜和锌的合金呈黄色称为黄铜。黄铜中随着锌含量的增加，其颜色由红变为金黄。含40—50%锌的黄铜色泽酷似18K金，可以用作装饰品的仿金合金。在此基础上添加其它元素，使耐蚀性进一步提高。

• 白铜

铜和镍的合金称为白铜。含18%镍和17%锌的白铜呈银白色，为仿银合金。

• 青铜

铜与铝、锡等元素形成的合金称为青铜，其颜色为黄中带绿，并随合金元素及其含量而发生变化。

由于铜合金比金、银合金原料成本低廉，从古至今在装饰材料中一直占有重要地位。除了制作装饰性构件和饰物以外，长期以来，各国用铜和铜合金来制造钱币，并以其不同的颜色，方便地区分不同的币值。用锡青铜铸成的佛像，常年耐海洋大气腐蚀形成庄严肃穆的古铜色，象征着佛法无边，普渡众生。中世纪教堂里镌刻在黄铜板上的墓志铭，总在人们心中唤起着对故人的美好回忆……。



香港天坛大佛。青铜铸造，高26.4米，重250吨