



## 铜：绿色的工程金属材料

作者：李廷举，大连理工大学 材料科学与工程学院 教授。



封面图片：湖北博物馆曾侯乙编钟[1]

(来源：湖北省博物馆 ([hbwww.org.cn](http://hbwww.org.cn)))

第四次工业革命是一场全新的绿色工业革命，其实质和特征是大幅度地提高资源生产率，经济增长与不可再生资源要素的全面脱钩，与二氧化碳等温室气体排放的脱钩。铜是人类最早使用的金属，被广泛地应用于工业的各个领域，其作为工程材料的产量和使用量仅次于铁和铝，位居第三。因其有很好的延展性、耐腐蚀性、导热和导电性能，在电气、电子工业中应用最广、用量最大，占总消费量一半以上。用于各种电缆和导线、电机和变压器、开关以及印刷线路板的制造中。在机械和运输车辆制造中，用于制造工业阀门和配件、仪表、滑动轴承、模具、热交换器和各种泵等。工业金属材料是否环境友好，需要从两方面评价。一是从矿石开采到制作成产品所消耗的能源和资源；二是产品的使用周期和回用率。例如，钢铁材料的回用率约 50%-60%，其余被腐蚀掉了；铜属于绿色材料，封面图所示的曾侯乙编钟是由六十五件青铜编钟组成的庞大的乐器，沉睡于地下 2430 年后还依然完好无损。本文将呈现更多的铜的各种面孔。

## 目录

铜：绿色的工程金属材料.....	1
1. 铜与人类文明.....	3
1.1 铜的基本属性 .....	3
1.2 铜与文化遗产 .....	4
1.3 铜的货币功能 .....	5
1.4 铜与生活 and 宗教 .....	6
2. 铜及铜合金冶炼和加工.....	7
2.1 铜冶炼 .....	7
2.2 铜电解精炼 .....	8
2.3 铜及铜合金铸造 .....	10
2.4 铜及铜合金成形 .....	12
3. 铜在关键行业中的应用.....	13
3.1 传热功能 .....	13
3.2 导电功能 .....	15
3.3 耐腐蚀和耐磨功能 .....	17
4. 铜及铜合金的回收再利用.....	18
4.1 阳极泥回收贵金属 .....	18
4.2 废杂铜的回收再利用 .....	18
参考资料及说明.....	19

# 1. 铜与人类文明

“新材料”的发现和使用时伴随着人类的文明进程。陶器作为第一种人造材料结束了人类的石器时代，使人类从蒙昧时代进入野蛮时代。在这个“野蛮”时代，人类发明了青铜。青铜制造的农具促进了农业发展，而青铜制造的兵器把人类带进了冷兵器时代。青铜时代是在三时代系统（Three-age System）中的第二时期，三时代系统是丹麦考古学家 Christian Jürgensen Thomsen 在 1836 年时所提出，共分为石器时代、青铜器时代与铁器时代[2]。

青铜时代（(Bronze Age) BC 4,500 ~ 1,000）在古代近东开始于苏美尔文明在前 4 千年的崛起。其特征是青铜的广泛使用，即利用铜与锡、铅、锑或砷的合金制作工具和武器。中国青铜器的使用在夏、商、周三代达到鼎盛期，而后还有春秋战国时代，现存至今的司母戊大方鼎是世界上罕见的大型青铜器[2]。

## 1.1 铜的基本属性

铜是一种化学元素，化学符号 Cu（拉丁语 Cuprum），原子序数 29，是过渡族金属。铜是一种存在于地壳和海洋中的金属。铜在地壳中的含量约为 0.01%，在个别铜矿床中，铜的含量可以达到 3%~5%。自然界中的铜多数以化合物即铜矿物存在，其物理性能见表 1[3]。纯铜导电、传热性好，硬度较低且塑性好，易于加工成各种形状的导电、传热产品。紫铜是比较纯净的一种铜，一般可近似认为是纯铜，导电性、塑性都较好，但强度、硬度较差一些。在铜中添加不同的元素可以获得不同性能的铜合金。例如，以 Ni 为主要添加元素的 Cu-Ni 系称为白铜，以 Zn 为主要添加元素的 Cu-Zn 系称为黄铜，其他铜合金统称为青铜。

表 1 铜的主要物理力学性能[3]

名称	符号	单位	数值
熔点	$T_m$	°C	1083
沸点		°C	约 2600
融化潜热		kJ/kg	205.4
比热容	$C_p$	J/(kg·K)	385
热导率	$\lambda$	W/(m·K)	388
线膨胀率		%	2.25
线膨胀系数	$\alpha_l$	°C <sup>-1</sup>	$17.0 \times 10^{-6} \sim 17.7 \times 10^{-6}$
密度	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	8930
电导率		m/(Ω·mm <sup>2</sup> )	35~38
导电率		%IACS	101.5(退火态)
弹性模量	E	GPa	100~130
抗拉强度	$R_m$	MPa	200~360
屈服强度	$R_{p0.2}$	MPa	60~250

## 1.2 铜与文化传承

铜具有靓丽的色彩和良好的耐腐蚀性及加工性，经常作为城市的标志性塑像传承者地方或民族的历史和文化。

图 1 是意大利艺术家阿图罗·迪·莫迪卡(Arturo Di Modica)设计制造的 3.4 米高，4.8 米长，重 3.2 吨的铜牛塑像，放置于美国纽约华尔街。华尔街铜牛是“力量和勇气”的象征，标志着华尔街的繁荣和财富[4]。喻义着只要铜牛在，股市就能永保“牛”市。其也被称作为“华尔街象征”。现实生活中，又将华尔街铜牛的寓意加以引申，代表着生意兴隆、开门旺市。自古中国亦有用牛气冲天等词来形容源源不断地活力和动力。



图1 美国纽约华尔街铜牛[图片来源：作者拍摄]

图 2 是中国福州三坊七巷中医治病铜像，表现了中国几千年的中医传承。



图2 中国福州三坊七巷中医治病铜像[图片来源：作者拍摄]

### 1.3 铜的货币功能

2000 多年前，中国春秋战国时期就出现了金属货币，主要有金币、银币和铜币。春秋时期是中国历史上从奴隶制到封建制的大变革时期，商品经济的进一步发展导致对流通货币的大量的需求，而金属铸造技术也日渐成熟，是大量铸造金属货币提供了必要性和可能性。这一时期货币的最大特点是货币铸造的种类繁多，币制混乱。由于当时周王朝的势力渐弱，列国均各自为政，经济也自成体系，所以各国自行铸造货币，相互流通，形成了多币制和多币型长期共存并用的特殊局面。



图3 中国山西博物馆展出的青铜币[图片来源：作者拍摄]

图 3 是中国山西博物馆展出的青铜币。秦朝统一货币后开始使用铜钱，陆续流通了 2000 多年直至清朝。图 4 示出了清朝不同年代的铜钱。新中国成立后，我国发行了多版人民币，其中的硬币也有使用铜镍合金制作的。



图4 清朝不同年代的铜钱[4]

#### 1.4 铜与生活 and 宗教

铜是与人类生活密切相关的金属。从 2000 多年前的青铜时代，人们就开始使用青铜制作各种器物。如：铜鼎：铜鼎是用来烹煮食物，后主要用于祭祀和宴享，是商周时期最重要的礼器之一。铜史（漏刻铜壶上的铜人像）；铜印（铜铸的印章，也称“铜章”）；铜兵（铜制的兵器）；铜狄（铜铸的人，即“铜人”。或称“金人”）；铜洗（铜制的盥洗用具）[5]；铜柱（铜制的柱子）；铜荷（铜制的烛台，形似荷叶）；铜狻（铜制的狮形香炉）；铜浑（铜制的浑天仪，又叫“铜仪”）[4]。现在铜也是我们生活中最常使用的材料之一。图 5 是铜制水龙头；图 6 是中国山东龙口的铜佛像。



图 5 铜制水龙头[图片来源：百路达（厦门）有限公司提供并授权使用]



图 6 中国山东龙口的铜佛像 [图片来源: 作者拍摄]

## 2. 铜及铜合金的冶炼和加工

### 2.1 铜的冶炼

自然界发现的含铜矿物有 200 多种, 但重要的矿物仅有 20 多种。主要有原生硫化铜矿物和次要的次生氧化铜矿物, 如表 2 所示[6]。

表 2 重要的铜矿物[6]

矿物	组成	Cu/%	颜色	光泽	莫氏硬度	相对密度
斑铜矿	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63.3	铜红至深黄色	金属	3	5.06~5.08
黄铜矿	$\text{CuFeS}_2$	34.5	黄铜色	金属	3.5~4	4.1~4.3
黝铜矿	$\text{Cu}_{10}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	45.8	灰至铁灰色	金属(发亮)	3~4.5	4.6
砷黝铜矿	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	51.6	铅灰至铁黑色	金属	3~4.5	4.37~4.49
辉铜矿	$\text{Cu}_2\text{S}$	79.8	铅灰至灰色	金属	2.5~3	5.5~5.8
铜蓝	$\text{CuS}$	66.4	靛蓝或灰黑色	半金属至树脂状	1.5~2	4.6~4.76
黑铜矿	$\text{CuO}$	79.9	灰黑色	金属	3.5	5.8~6.4
孔雀石	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	57.3	浅绿色	金刚至土色	3.5~4	3.9~4.08
蓝铜矿	$2\text{CuCO}_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	55.1	天蓝色	玻璃状近于金刚	3.5~4	3.77~3.89
水胆矾	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	56.2	绿色	玻璃状	3.5~4	3.9
氯铜矿	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_4$	59.5	绿色	金刚至玻璃	3~3.5	3.76~3.78
硅孔雀石	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36.0	绿至蓝色	玻璃至土色	2.4	2.0~2.4
自然铜	$\text{Cu}$	100	铜红色	金属	2.5~3	8.95

铜冶炼技术的发展经历了漫长的过程, 可以分为火法冶炼、湿法冶金和电冶金三大类, 也有人将电冶金归于火法冶金的范畴。目前, 从硫化矿中提取铜, 主要采用火法冶炼为主, 其产量约占世界铜总产量的 85%。

火法冶炼一般是先将含铜百分之几或千分之几的原矿石，通过选矿提高到20-30%，作为铜精矿，在密闭鼓风机、反射炉、电炉或闪速炉进行造钼熔炼，产出的熔钼(冰铜)接着送入转炉进行吹炼成粗铜，再在另一种反射炉内经过氧化精炼脱杂，或铸成阳极板进行电解，获得品位高达99.9%的电解铜。该流程简短、适应性强，铜的回收率可达95%，但因矿石中的硫在造钼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[6][7]。

现代湿法冶炼有硫酸化焙烧-浸出-电积、浸出-萃取-电积、细菌浸出等法，适于低品位复杂矿、氧化铜矿、含铜废矿石的堆浸、槽浸选用或就地浸出。湿法冶炼技术正在逐步推广，预计本世纪末可达总产量的20%，湿法冶炼的推出使铜的冶炼成本大大地降低[6][7]。

## 2.2 铜的电解精炼

火法精炼产出的精铜品位一般为99.2%-99.7%，不能满足现代工业对铜产品的需求，需要经过精炼去除其中的杂质，获得99.9% (3N) -99.9999% (6N) 的高纯铜。精炼的方法有区域精炼法、电解法、电子束精炼法、阴离子交换法等。目前电解精炼法最为成熟、应用较为广泛。

电解精炼是以火法精炼产出的精铜为阳极，以电解产出的薄铜片（原始极片）作阴极，以硫酸铜和硫酸的水溶液作电解液。在直流电的作用下，阳极铜电化学溶解，铜离子在阴极沉积，杂质则进入阳极泥和电解液中，从而实现了铜与杂质的分离。铜电解精炼的流程如图7所示[6]。

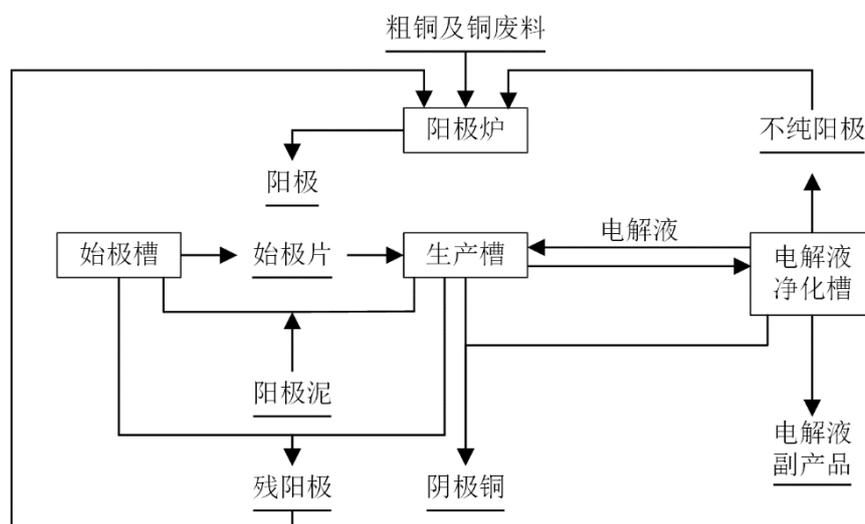
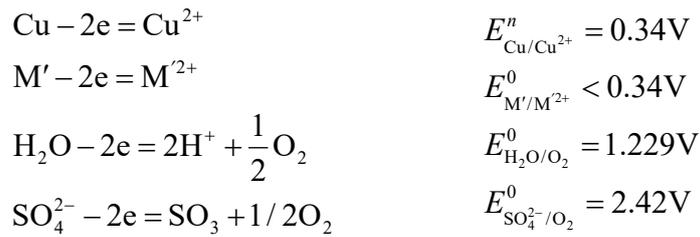


图7 铜电解精炼示意图[6]

铜电解精炼时，阳极上进行的氧化反应：



式中 M' 是指 Ni、Pb、As 等比 Cu 更负电性的金属。因其浓度很低，其电极电位将进一步地降低，从而将优先溶解进入电解液。由于阳极的主要组成是铜，因此阳极的主要反应是将铜溶解形成 Cu<sup>2+</sup> 扩散的反应。至于 H<sub>2</sub>O 和失去电子的氧化反应，由于其电极电位比铜正得多，故在阳极上是不可能进行的。另外，如 Ag、Au、Pt 等电位更正的贵金属、铂族金属和稀散金属，更不能溶解而落到电解槽底部。

在阴极上进行的还原反应：



氢的标准电位较铜负，且在铜阳极上的超电压使氢的电极电位更负，所以在正常电解精炼条件下，阴极不会析出氢，而只有铜的析出。同样，标准电位比铜低而浓度又小的负电性金属 M'，在阳极析出也是不可能的[6]。

图 8 是作为阴极获得的高纯铜板。此方法的最大缺点是工艺过程中使用了硫酸，生产过程需要采取严苛的环保措施。



图 8 作为阴极获得的高纯铜板 [图片来源: China.makepolo.com]

电子束精炼法是在真空下利用电子束轰击原料铜产生的高温使其熔化。真空和高温可以使饱和蒸气压低的杂质气化；结合定向凝固可以使溶质分配系数低的杂质偏聚端部，达到精炼提纯的目的。此方法比电解法环保，但设备投资大，生产效率也比电解法低。

### 2.3 铜及铜合金的铸造

工业产品使用的铜或铜合金产品形状多为棒、线、板、箔、管等。为此，需要将电解铜板高温熔化，或根据需要添加一些合金元素熔炼成铜合金液，依据产品的需要铸造出不同形状铜铸坯。

**铜及铜合金的熔炼：**工业生产中，常用的铸造铜及铜合金的熔化炉多为工频有芯炉和中频感应炉。工频有芯炉多用于大批量连续铸造生产；中频感应炉多用于多品种、小批量及小规格铸坯的生产。**铜合金的熔炼存在严重的环保问题**，特别是当合金中存在低熔点、易挥发的合金元素时，更需要关注。例如，黄铜是铜和锌(Cu-Zn)的合金，其机械性能和耐磨性能都很好，可用于制造精密仪器、船舶的零件、枪炮的弹壳、硬币等。黄铜的锌铜含量一般在30%—40%，铜的熔点为1083℃，锌的沸点约907℃，黄铜的熔炼温度高于锌的沸点，会产生大量的锌蒸汽，造成严重的环境污染，工厂在熔炼炉上方设置环保装备。

**铜及铜合金的铸造：**现在铜铸坯大多采用连续铸造或半连续铸造，根据不同产品的需求，采用的主要铸造方法有：（1）垂直下引半连续铸造。可以铸造圆形铸坯（Ingot）、方形铸坯（Square Billet）、厚板坯（Slab）、空心圆坯（Hollow round）等，此方法的特点是铸坯尺寸范围大，生产效率高，但是，一般地坑深度为6米左右，铸坯达到一定长度后需要停止铸造，取出铸坯，清理结晶器后重新开始下一轮铸造，是非连续性铸造。而且铸坯需要切头去尾。（2）水平连续铸造。可以铸造圆棒坯（Round billet）、板带坯（Strip）、空心圆坯（Hollow round）等，此方法的特点是可以连续铸造生产，切割锯依据需要在线将铸坯切割成需要的长度，但是，此方法不能铸造大断面的铸坯。（3）上引连续铸造。可以铸造圆棒坯（Round billet）、板带坯（Strip）、空心圆坯（Hollow round）等。此方法的特点是可以连续铸造生产，铸造出的铸坯在线成卷，但是，此方法不能铸造大断面的铸坯，由于是反重力方向铸造，铸坯内部致密度稍差。

图9是锡磷青铜板带坯的水平连续铸造照片。图10是铜铬锆合金圆坯的垂直半连续铸造照片。



图9 锡磷青铜板带坯的水平连续铸造照片[图片来源：作者拍摄]



图10 铜铬锆合金圆坯垂直半连续铸造照片[图片来源：作者拍摄于宁波金田铜业（集团）股份有限公司，授权使用]

## 2.4 铜及铜合金成形

铜是面心立方结构，极易进行塑性变形。我们可以根据需要将铜及其合金加工成板、带、箔、棒、线、管等不同的形状。

例如，铜箔作为新能源汽车等锂电池**负极集流体**，占锂电池成本的 5%-8%，是一款重要的锂电材料。铜箔在锂电池中既充当负极活性物质的载体，又充当负极电子流的收集与传输体，因此电解铜箔的抗拉强度、延伸性、致密性、表面粗糙度、厚度均匀性及外观质量等对锂离子电池负极制作工艺和锂离子电池的电化学性能有着很大的影响。锂电铜箔一般厚度通常在 7—20  $\mu\text{m}$  之间。目前新能源汽车配备的铜箔厚度为 4—12  $\mu\text{m}$ ，整车铜箔的质量达到 10kg 以上。锂电铜箔厚度越小，意味着电池的重量将越轻。同时，更薄的锂电铜箔也意味着更小的电阻，则电池的性能也将得到提升。图 11 是锂电池电解铜箔打卷过程的照片。

再如，铜银合金丝广泛应用于消费电子领域，如耳机、手机、电脑音圈，半导体键合丝，以及音视频信号传输线等。图 12 示出了铜银合金丝连续拉拔加工及样品照片。



图11 锂电池铜箔打卷过程照片[图片来源：宁波金田铜业（集团）股份有限公司提供，授权使用]

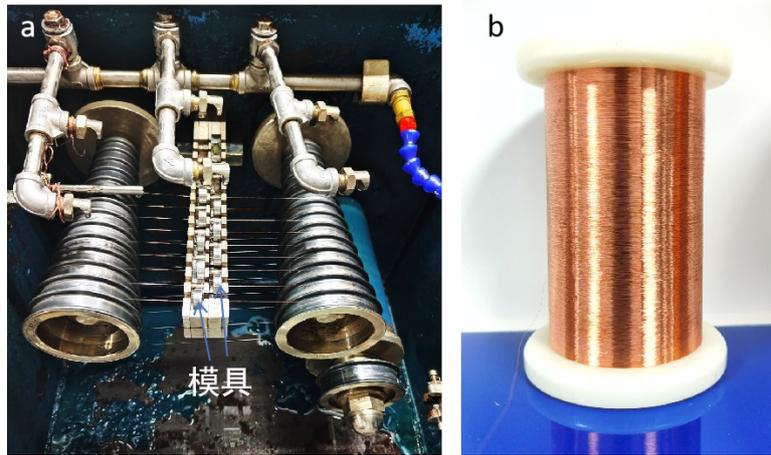


图 12 铜银合金丝连续拉拔加工及样品照片 [图片来源：中科晶益（东莞）材料科技有限公司，授权使用]

### 3. 铜在关键行业中的应用

#### 3.1 传热功能

发电厂要用许多冷凝器使涡轮机排出的蒸气得到冷凝。在冷冻厂中用冷凝器来冷凝氨和氟利昂之类的制冷剂蒸气。海水淡化装置和我们日常生活中使用的空调也是如此。制冷剂最终是要在蒸发器中吸收热量，在冷凝器中放出热量，管子外面还要与散热片相连，如图 13 所示。铜的导热性好，焊接性能、机械强度也足够，且铜的延展性好，接口处容易密封，不易漏氟。因此成为冷凝管的首选材料，全世界每年使用铜冷凝管约 200 万吨。图 14 是铜冷凝管，为了提高传热效率（增大传热面积）将铜管内壁加工成锯齿状。

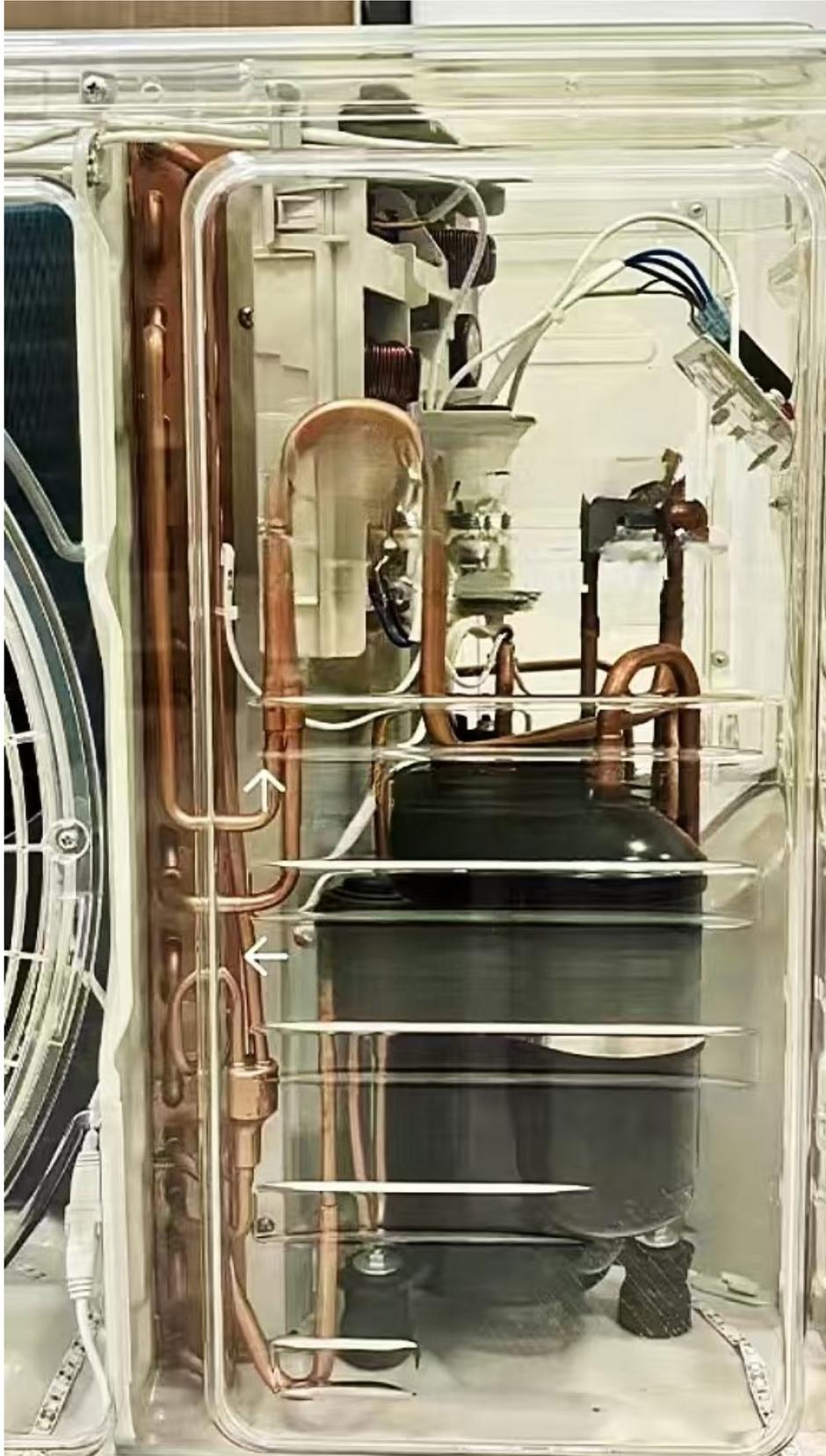


图 13 空调内部制冷系统[图片来源：金龙精密铜管集团股份有限公司提供，授权使用]

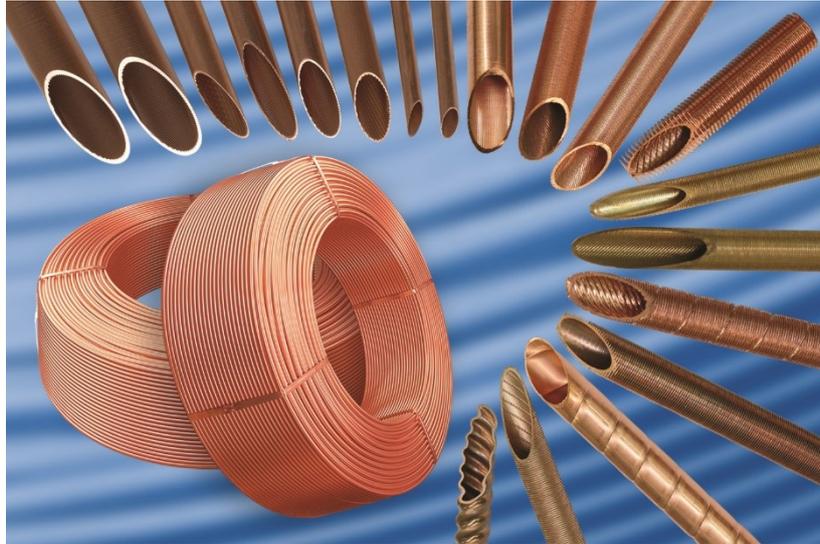


图14 铜冷凝管[图片来源：金龙精密铜管集团股份有限公司提供，授权使用]

### 3.2 导电功能

铜银合金丝以银为主要合金元素，兼具高导电性、良好的机械性能、优异的耐磨性和抗熔焊性，以及出色的热稳定性。经过直接加工或包覆绝缘层制成的漆包线，如图 12 所示，广泛地应用于消费电子领域，如耳机、手机、电脑音圈，以及半导体键合丝等。在音视频传输线领域，面对日益增长的高速传输需求，铜银合金丝凭借其高保真传输特性，在高频率范围内展现出卓越的抗信号衰减能力，从而确保音视频信号的清晰传输。在键合线应用中，铜银合金丝提供了金线的经济替代方案，以更低的成本实现高导电性和高机械强度的结合。出色的延展性和抗断裂性能使其在高速键合设备中依然能够维持稳定的连接，显著地降低断线风险。这些特点使铜银合金丝在高性能电子设备制造中，成为兼具可靠性和经济性的理想材料，推动了电子器件在轻薄化和高效能方向的发展。

随着集成电路技术的飞速发展，引线框架作为关键组件，其性能要求日益提高。引线框架作为集成电路的芯片载体，是一种借助于键合材料（金丝、铝丝、铜丝）实现芯片内部电路引出端与外引线的电气连接，形成电气回路的关键结构件，它起到了和外部导线连接的桥梁作用，绝大部分的半导体集成块中都需要使用引线框架，是电子信息产业中重要的基础材料。铜合金因其优良的导电、导热性能以及较高的强度和硬度，成为引线框架材料的首选。目前常用的铜合金引线框架主要有 Cu-Fe 系、Cu-Ni-Si 系、Cu-Cr 系等。图 15 是轧制的引线框架铜合金带材。



图15 轧制的引线框架铜合金带材[图片来源：作者拍摄]

高速铁路是由接触网线、列车和路轨三部分组成，高铁接触网线是高铁和电源动力的连接线，要求高的导电性、高强度、高的耐磨性和抗电蚀性等。其关乎高铁运行安全性和经济性，高铁发生的故障大都为接触网断电所致，我国高铁第一起安全事故发生在武广高铁接触线与列车受电弓交接处。目前，铜合金是制作高铁接触网线的唯一可用材料。我国建设时速超 350 公里的高铁，接触网线需要更大的架线张力和更高的安全系数，更是需要更高综合性能的铜合金接触网线。图 16 示出了京沪高铁的 Cu-Cr-Zr 接触网线。

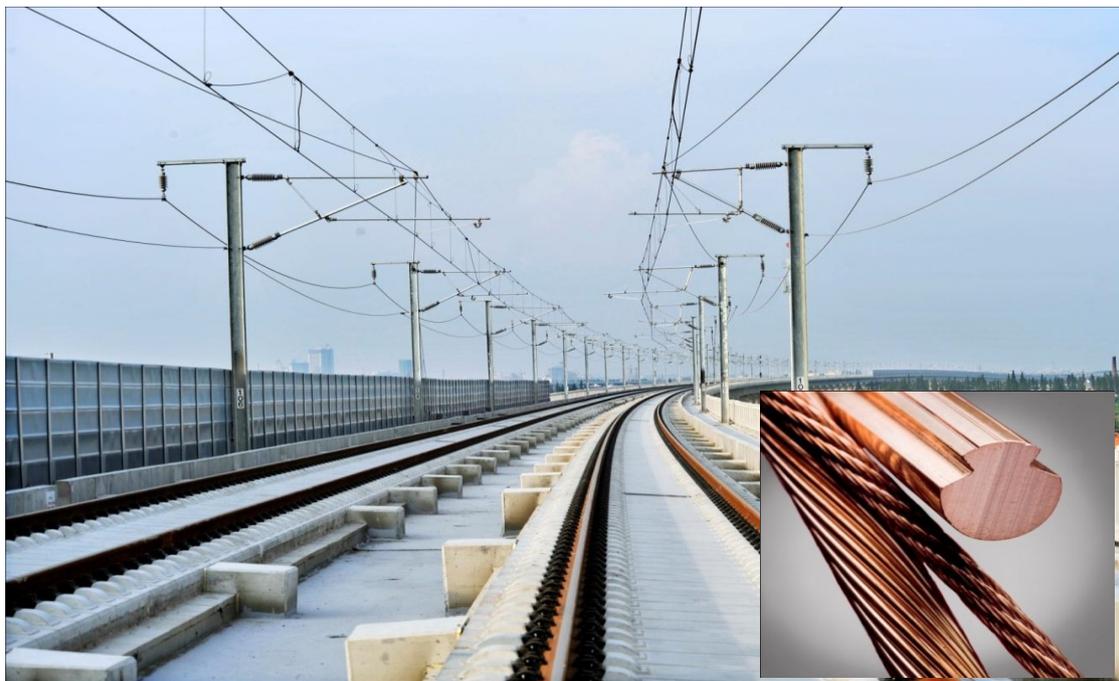


图16 京沪高铁的 Cu-Cr-Zr 接触网线[图片来源：北京赛尔克瑞特电工有限公司提供，授权使用]

### 3.3 耐腐蚀和耐磨功能

铜及铜合金具有优异的耐腐蚀性能，工业领域使用的液体传输管道、阀门等大多使用铜合金制作，例如，船舶、军舰、各种冷凝器、阀门等。船舶、军舰的螺旋桨推进器是铜合金应用的另一个例子。螺旋桨推进器也称为推进装置中的能量变化器，它将发动机产生的动力转变成船舶行进的推力，以克服船舶在水中航行的阻力，推动船的前进。要求制作材料具有耐海水腐蚀性、耐生物附着、高强度和抗海水空化等，通常使用铜合金制作。图 17 是四叶铜合金船用螺旋桨。

轴瓦（或轴套）是滑动轴承和轴颈接触的部分，形状为瓦状的半圆柱面或圆环形，表面非常光滑。要求制作材料具有耐磨性、抗压强度和易加工性等，一般用青铜、减摩合金等耐磨材料制成。轴瓦有整体式和剖分式两种，整体式轴瓦通常称为轴套，整体式轴瓦有无油沟和有油沟两种。轴瓦与轴颈采用间隙配合，一般不随轴旋转。图 18 是大型铜合金整体式轴瓦[8]。



图17 四叶铜合金船用螺旋桨 [图片来源：作者拍摄]



图18 大型铜合金整体式轴瓦 (图片来源：[7])

## 4. 铜及铜合金的回收再利用

铜冶炼、加工制备和使用过程的环保和再利用可以分为二部分。一是冶炼和电解过程的泥渣中贵金属的提取；二是废杂铜的回收再利用。

### 4.1 阳极泥回收贵金属[9]

铜电解阳极泥的产率为 1%，含有金、银、铂、钯等贵金属，具有较高的回收利用价值。在回收贵金属的同时，减少二次污染和“三废”达标排放，在发展铜加工产业的基础上实现铜资源的循环利用，达到污染减排的目的。

采用湿法工艺回收金、银等贵金属，主要工序有：富集贵金属生产工序，预先脱除杂质为综合回收创造条件。污染物主要有阳极泥焙烧烟尘、SO<sub>2</sub>、硫酸雾以及提取铜金属时产生含高浓度砷的废碱液；提取金生产工序，即浸出金后从浸出液中还原出金粉，排放污染物主要是硫酸雾，金还原置换后的废酸液；提取银生产工序，即浸出银后从浸出液中还原提取银粉，排放污染物主要有还原后的废液（pH 为 13 并含有高浓度亚硫酸钠的废碱）。

### 4.2 废杂铜的回收再利用

随着循环经济的快速发展，再生铜的利用势在必行。生产再生铜的方法主要有两类：第一类，将废杂铜直接熔炼成不同牌号的铜合金或精铜，称之为直接利用法；第二类，将杂铜先经火法处理铸成阳极铜，然后电解精炼成电解铜，并在电解过程中回收其他有价元素。相对由矿石冶炼→电解提纯→生产产品而言，直接利用废杂铜生产产品将节能 80%以上，比电解提纯→生产产品节能约 50%，且电解过程对环境污染严重。因此，对废杂铜进行合理的分选、分离后按照第一类直接利用法将废杂铜直接熔炼成不同牌号的铜合金或精铜制品，以期达到直接利用废旧铜生产产品的目的，用最小的投资提高废杂铜利用率及利用水平，减少金属损耗，减少环境污染。它主要包括 3 大流程：

分选：分选过程具备铜料的破碎、清洗、除油等功能；具备分离非金属的能力；具备自动分离混杂在铜料中的铁、铝、不锈钢等非铜金属的能力；能够按类别区分不同牌号的铜料，以利于下一步对铜及其合金元素的充分合理利用和精品铜材的开发。

分离：分离过程包括废杂铜表面污垢的清除和铜料表面涂、镀、焊材料的分离和回收。铜料表面的低熔点钎、镀金属和废电磁线表面漆膜的分离回收，以达到净化铜料提高可用价值，利于保质再生的目的。同时对这些涂、镀、焊材料加以资源化利用，消除其对环境造成的危害。

利用：经过分选、分离过程，把紫杂铜直接投入冶金炉冶炼、感应炉精炼，再利用连铸连轧或上引等工序组成的铜杆生产线，直接制造高品质电工用无氧铜杆；把分类清晰的铜合金按照其不同成分，分别直接制造简单的黄铜合金、复杂

的黄铜合金（不含铅）、耐蚀的黄铜合金（铝黄铜和锡黄铜）、锡磷青铜、白铜和铅黄铜等产品，实现保质的目标。

根据中国再生创新联盟会的数据：中国再生铜的产量 2019 年约 330 万吨，2020 年约 325 万吨，2021 年约 365 万吨，2022 年约 375 万吨，2023 年约 395 万吨。而国外近几年再生铜利用量每年约为 450 万吨左右，占电解铜总量的 30.7%，其中美国每年约 200 多万吨，约占世界总量的 25%。中国 2020 年再生电解铜占当年电解铜(or 的铜) 总量的 24.1%。

本文的完成要感谢在各方的大力支持。在此，衷心感谢所有为此付出努力和贡献的个人与单位。特别感谢宁波金田铜业（集团）股份有限公司王永如教授级高级工程师，提供了精美的图片和 4.2 节的内容；感谢华中科技大学唐跃进教授、金龙精密铜管集团股份有限公司张忠涛教授级高级工程师和中科晶益（东莞）材料科技有限公司付莹教授提供了精美的图片和文字；感谢大连理工大学材料科学与工程学院研究生李国梁提供了部分文字帮助。特别感谢宁波金田铜业（集团）股份有限公司王永如教授级高级工程师对全文的校正。

## 参考资料及说明

- [1] 曾侯乙编钟，1978年出土于湖北随州曾侯乙墓，年代为战国早期。钟架长7.48米、高2.65米。全套编钟共六十五件，分三层八组悬挂在呈曲尺形的铜木结构钟架上，上层为三组共19件钮钟、中下层五组共45件甬钟，及一件楚惠王赠送给曾侯乙的铸钟所组成。钟及架、钩上共有铭文3755字，内容为编号、记事、标音及乐律理论。每件钟均能奏出呈三度音程的双音，整套编钟音域可跨五个半八度，中心音区十二个半音齐备，能演奏五声、六声或七声音阶的乐曲。
- [2] 中国正安县博物馆 <https://www.zabwg.cn/home/87/show>.
- [3] 360文库.
- [4] 360百科.
- [5] 中国古人常以铜为镜。语出《宋·欧阳修·宋祁·新唐书·卷一一零·列传第二十二 魏徵》：“以铜为鉴，可正衣冠；以古为鉴，可知兴替；以人为鉴，可明得失。朕尝保此三鉴，内防己过。今魏徵逝，一鉴亡矣。”（用铜做镜子，可以整理好一个人的穿戴；用历史作为镜子，可以知道历史上的兴盛衰亡；用别人作自己的镜子，可以知道自己每一天的得失。）
- [6] 张毅，陈小红，田保红等，铜及铜合金冶炼、加工与应用[M]. 北京：化学工业出版社，2016.
- [7] Davenport. W. G, King. M, Schlesinger. M, Biswas. A. K, Extractive Metallurgy of Copper [M], Elsevier, 北京：化学工业出版社 编译出版，2006.
- [8] 李德成，大型轴瓦轴套铸造工艺研究及应用，东北三省四市铸造年会，沈阳，2017.
- [9] 王方园，吴华英，废铜提炼回收重金属加工生产中“三废”综合利用及治理，环境保护与循环经济，2010，中国知网 <http://www.cnki.net>.