

# 超高强铜钛合金的研究现状

崔振山<sup>1</sup>, 黄 岚<sup>1</sup>, 孟祥鹏<sup>2</sup>, 雷 前<sup>1\*</sup>, 肖 柱<sup>3</sup>, 李 周<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中南大学粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙

<sup>2</sup>宁波博威合金材料股份有限公司, 浙江 宁波

<sup>3</sup>中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙

Email: \*leiqian@csu.edu.cn

收稿日期: 2020年8月11日; 录用日期: 2020年8月24日; 发布日期: 2020年8月31日

---

## 摘 要

超高强弹性铜合金是一类具有优异强度和导电导热性能的材料, 目前已经广泛应用于载流元器件、电磁继电器以及航空航天器件等领域, 其中Cu-Ti系合金因其优异的力学性能和加工成型性而得到关注。本文综述了超高强铜钛合金的合金成分设计、制备加工工艺和相关物理性能, 在此基础上分析了铜钛合金开发应用中所需要解决的问题, 并对铜钛合金的未来发展趋势进行了分析和展望。

## 关键词

高耐热铜合金, 高强, 高导, 时效强化

---

# Research Progress of Ultrahigh-Strength Copper-Titanium Alloys

Zhenshan Cui<sup>1</sup>, Lan Huang<sup>1</sup>, Xiangpeng Meng<sup>2</sup>, Qian Lei<sup>1\*</sup>, Zhu Xiao<sup>3</sup>, Zhou Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Ningbo Powerway Alloy Material Co. Ltd, Ningbo Zhejiang

<sup>3</sup>School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

Email: \*leiqian@csu.edu.cn

Received: Aug. 11<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 24<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 31<sup>st</sup>, 2020

---

## Abstract

Ultra-high strength elastic copper alloys with excellent strength, conductive and thermal conduc-

\*通讯作者。

tivity have been widely used in the fields of current-carrying components, electromagnetic relays and aerospace devices. After years of research, a series of advances have been made in the research of Cu-Ti alloy materials. In this paper, the alloy composition design, preparation and processing technology and properties of superhigh strength copper-titanium alloy are reviewed, the problems to be solved in the development and application of copper-titanium alloy are pointed out, and the future development trends of copper-titanium alloys are analyzed and prospected.

## Keywords

High Heat Resistant Copper Alloy, High Strength, High Conductivity, Aging Strengthening

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

铜基合金由于其高导电导热性能而被广泛应用于引线框架材料、接触网线、簧片和连接件等载流元器件中。对于微电子元件中使用的小型器件，还需要这些合金具有高强度和弹性性能。铜钎合金因其优异的强度和导电性能曾经作为导电弹性材料广泛使用于各类载流弹性元器件中。但是钎铜合金在熔炼、热加工、热处理、机械加工和酸洗过程中会产生有毒含钎烟尘，这会危害生产工人的健康，引发严重的慢性肺病[1]。同时钎铜合金材料具有生产周期长、高温弹性性能低、成品率低、能耗高以及产品价格高等缺点。因此，国内外科学家们近年来逐步开发了一系列如 Cu-Sn-P、Cu-Ni-Al、Cu-Ni-Zn、Cu-Ni-Si、Cu-Ni-Sn 和 Cu-Ti 等性能优异的弹性铜合金材料以部分代替铜钎合金[2]。其中，随着科学工作者对 Cu-Ti 合金研究的不断深入，研究结果发现：Cu-Ti 合金因具有优异的屈服强度、弹性极限、导电性能、延展性和抗疲劳性能，从而在电器接触元件中具有广阔的应用。但是目前 Cu-Ti 合金产品仍然主要依赖于从国外进口，严重制约了涉及该类材料的仪器设备的自主化生产。因此，本文首先综述了目前国内外报道的 Cu-Ti 合金的成分设计、制备与加工工艺、物理性能等研究进展，分析了国内外 Cu-Ti 合金的研究发展趋势，并对其未来的研究方向进行了设想，希望为国内相关领域的科研工作者和生产企业提供有益参考。

## 2. Cu-Ti 合金设计

根据 Cu-Ti 二元相图(图 1) Ti 在 Cu 中 886℃时的溶解度可高达 6.2 wt%，而室温下 Ti 在 Cu 中的溶解度仅为 0.4 wt%。因此，Cu-Ti 合金可以通过高温固溶处理促进 Ti 在 Cu 基体中的溶解度，然后再在低温下进行时效获得纳米级的沉淀相粒子，从而通过奥罗万机制强化基体，同时净化基体以保持一定的导电性能。在 Cu-Ti 二元相图的富 Cu 角，350℃~500℃间 Cu<sub>4</sub>Ti 会发生多晶型转变，即时效温度低于 350℃时析出 β'-Cu<sub>4</sub>Ti (四方晶系 D1a 结构; Ni<sub>4</sub>Mo 类型; I4/m, 有些文献也称为 α-Cu<sub>4</sub>Ti)的沉淀相，而温度高于 500℃时脱溶沉淀则生成 β-Cu<sub>4</sub>Ti (正交晶系 Au<sub>4</sub>Zr 结构)析出相。Soffa 等[3]认为正交结构的 β-Cu<sub>4</sub>Ti 相是通过熵效应在高温下稳定存在，而在室温下主要是四方结构的 β'-Cu<sub>4</sub>Ti 相。Nagarjuna 等[4]通过研究发现，当 Ti 含量 > 4 wt%时，合金在在淬火时发生调幅分解，合金基体中出现细小的 β'-Cu<sub>4</sub>Ti 沉淀相。

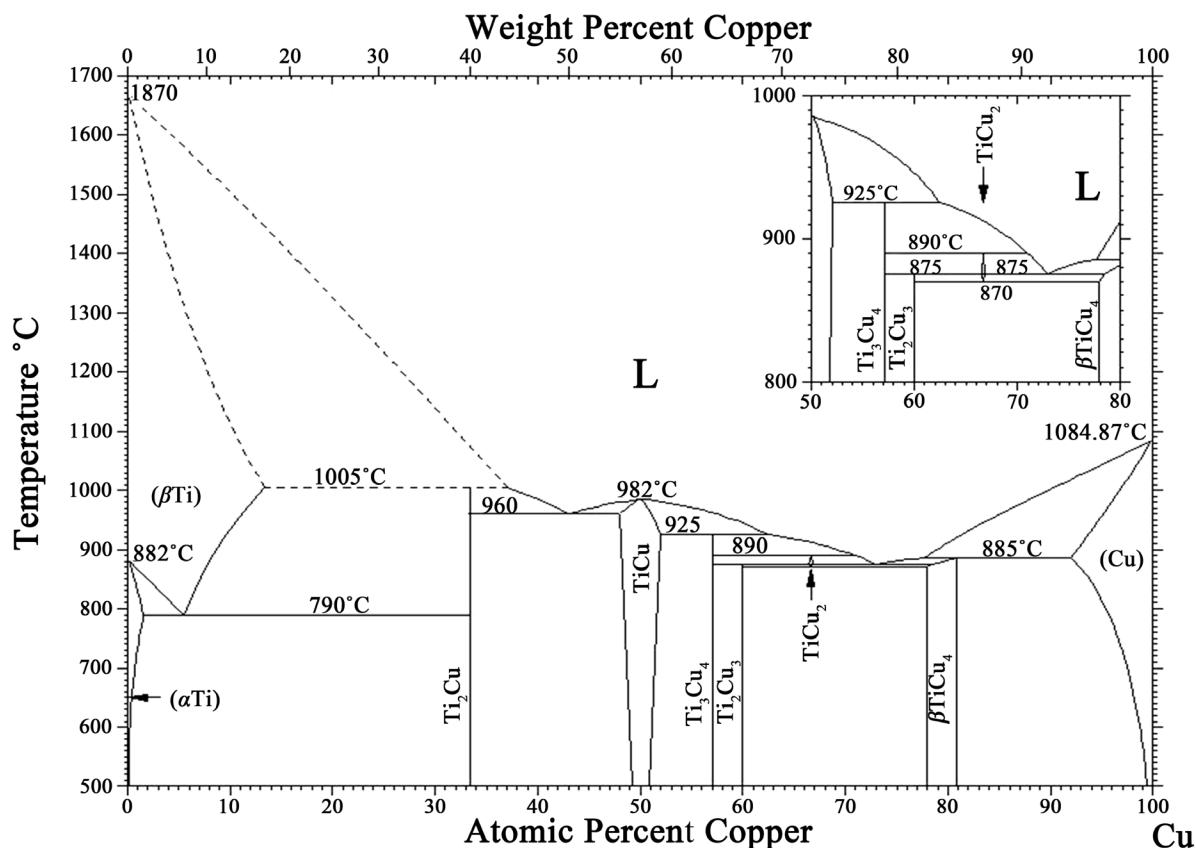


Figure 1. Binary phase diagram of Cu-Ti [3]

图 1. Cu-Ti 的二元相图[3]

张楠等[5]通过研究不同 Ti 含量的 Cu-Ti 合金发现, Cu-Ti 合金中 Ti 含量要 $>0.6$  wt%时才具有时效强化效果, 并且随着 Ti 含量的增加合金的硬度有明显提升。由于 Ti 固溶到 Cu 基体中, 增大了晶格畸变程度, 影响电子的散射, 降低了 Cu-Ti 合金的导电率。Nagarjuna 等[4]通过研究不同 Ti 含量(1.5、2.7、4.5 和 5.0 wt%)对 Cu-Ti 合金性能的影响发现, 在固溶态 Cu-Ti 合金的电阻随着 Ti 含量增加而增大。而当 Ti 含量  $> 4$  wt%时, Cu-Ti 合金的电阻随着电阻增加而下降, 这是由于当 Ti 含量  $> 4$  wt%时, 合金淬火过程中快速发生调幅分解析出  $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti 相, 从而降低了 Ti 原子在 Cu 基体的含量, 减小 Cu 晶格的畸变程度, 降低对电子的散射, 提高材料的导电性能。固溶+时效态合金由于析出  $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti 细小沉淀相而净化了合金基体, 因此合金的电阻率较固溶态合金的电阻率有所下降; 而固溶 + 冷变形 + 峰时效态合金的电阻率随着 Ti 含量的增加而增大。Nagarjuna 等认为当 Ti 含量较低时加工硬化对合金电导率的影响很小, 但当 Ti 含量很高时由于冷变形过程中位错密度的增加以及形变孪晶的形成显著降低了合金的电导率。提高 Cu-Ti 合金的电导率主要依靠降低 Cu 基体中的 Ti 含量, 而强度的提高则主要依靠于合金的脱溶沉淀析出相 Cu<sub>4</sub>Ti 粒子的体积分数与尺寸大小, 电导率和强度的综合性能的提高则依靠合金元素成分的设计和脱溶沉淀过程。

## 2.1. Cu-Ti 合金相变特征

铜钛合金的时效析出过程一般被认为包括早期的短程有序、调幅分解及长程有序和胞状反应。国外的学者对 Cu-Ti 合金时效初期的相变顺序做了大量研究[6] [7]。经典理论认为 Cu-Ti 合金的调幅分解无需形核, 即过饱和固溶体通过上坡扩散形成贫富溶质区, 随着时效的进行, 富溶质区发生有序化形成与基体共格的亚稳有序相。而后随着时效时间的延长, 亚稳有序相失去与基体的共格关系, 并形成与基体非

共格的有序相，最终过饱和固溶体分解为与基体非共格的有序相  $\text{Cu}_4\text{Ti}$  和 Cu 基体。Woychik 等[8]认为通过快速凝固法制备的 Cu-Ti 合金在调幅分解之前溶质原子会发生短程有序化。卫英慧等[9]认为 Cu-Ti 合金的早期相变过程为：过饱和固溶体→短程有序相→基体+长程有序相，并认为调幅组织波长  $\lambda$  随时效时间  $t^{1/3}$  的变化，调幅分解与调幅组织长大这两个阶段激活能是不同的，表明调幅分解与调幅组织长大为两个不同的过程。其中调幅分解及长程有序化为连续型相变，而调幅组织长大为非连续型相变。卫英慧等[10]认为在时效温度  $> 600^\circ\text{C}$  时胞状反应发生相界面迁移及溶质原子扩散的形核长大型相变，而当时效温度  $< 600^\circ\text{C}$  时平衡相通过调幅组织在晶界处形核直接形成，或由调幅组织中亚稳有序相粗化并通过与平衡相重组的方式形成的。卫英慧通过 Cu-4Ti (wt%) 确定在较低时效温度下(时效温度  $< 600^\circ\text{C}$ ) Cu-Ti 合金的时效析出顺序为：过饱和固溶体→调幅分解→有序化→亚稳有序相→稳定相。卫英慧等[11]和张楠等[5]发现，固溶处理的过饱和固溶体淬火过程中会发生调幅分解，在 XRD、TEM 图中通常伴随着卫星峰、卫星斑点(图 2)，在 HRTEM 图像中也有明显的调幅分级波状条纹(图 3)。

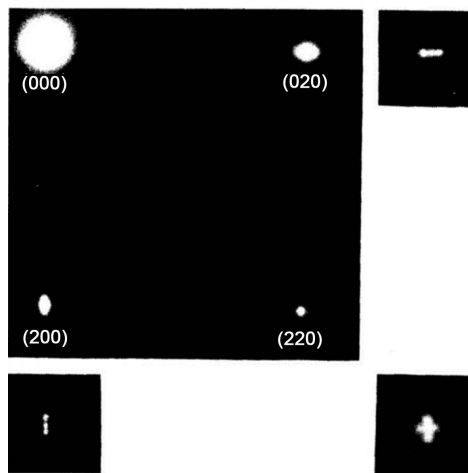


Figure 2. Satellite spots of [001] electron diffraction pattern in a solid solution treated Cu-Ti alloy [3]

图 2. 固溶态 Cu-Ti 合金[001]电子衍射图观察到的卫星斑点[3]

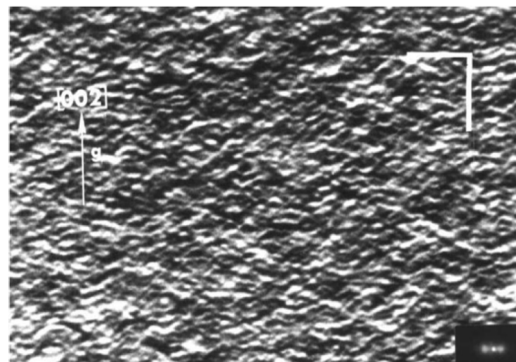


Figure 3. Strain contrast fringes of Cu-Ti alloy along the  $\langle 002 \rangle$  matrix direction; two-beam bright-field electron micrograph,  $g = [002]$  [3]

图 3. Cu-Ti 合金沿着  $\langle 002 \rangle$  基体方向的应变衬度条纹；双光束明场相， $g = [002]$  [3]

## 2.2. 微合金化元素对 Cu-Ti 合金组织与性能的影响

由于 Ti 元素可固溶在 Cu 基体中，大幅降低了 Cu-Ti 合金的导电性能，因此需要考虑降低 Cu-Ti 合金中固溶的 Ti 元素含量。目前主要是通过加入第三组元，从而利用固态相变形成与 Ti 形成金属间化合

物来降低固溶在 Cu 基体中的 Ti 含量,从而提高 Cu-Ti 合金的导电性能和力学性能。常见的微合金化元素如下:

**Cr 元素:** 在高温下 Cr 在 Cu 中的固溶度为 1.56 wt%, 在室温下固溶度  $< 0.03$  wt%, 因此在固溶处理条件下, Cr 在 Cu 基体中过饱和会产生高度的热力学亚稳定性, 从而为 Cr 的析出提供析出动力。Markandeya 等[12] [13] [14]研究了向 Cu-3Ti (wt%)和 Cu-4Ti (wt%)合金中添加 1 wt% Cr 后合金的组织与性能的变化, 研究发现固溶处理后, 两种 Ti 含量的合金在固溶处理后都产生了  $\text{Cr}_2\text{Ti}$  相, 并且在 Cu-4Ti-1Cr (wt%)合金中观察到调幅组织和  $\beta'$ - $\text{Cu}_4\text{Ti}$  析出相, 而 Cu-3Ti-1Cr (wt%)合金中则仅存在  $\beta'$ - $\text{Cu}_4\text{Ti}$  相而无调幅组织。同时发现, Cu-4Ti-1Cr (wt%)的硬度远大于 Cu-3Ti-1Cr (wt%), 表明 Cu-Ti 合金中形成的调幅组织对合金硬度的贡献较大。由于 Cr 和 Ti 均有固溶于 Cu 基体中, 固溶处理 + 淬火态的 Cu-Ti-Cr 合金的导电能要稍微低于相对应的 Cu-Ti 合金。Cu-Ti 合金的屈服强度和抗拉强度在时效处理后均得到了明显提升, 但是仍有部分 Ti 和 Cr 固溶于 Cu 基体中, 因此时效态的 Cu-Ti-Cr 合金的导电性能比相同 Ti 含量的 Cu-Ti 合金低。

**Zr 元素:** 曹兴民等[15]研究了添加 Zr 对 Cu-Ti 合金的耐热性影响规律, 添加 0.1 wt% Zr 即可使 Cu-3.65Ti (wt%)合金的软化温度由 485°C 提高到 540°C。Zr 元素的加入, 能阻碍 Ti 元素在晶界的扩散, 从而抑制 Cu-Ti 合金中  $\beta'$ - $\text{Cu}_4\text{Ti}$  向  $\beta$ - $\text{Cu}_4\text{Ti}$  的多晶型转变, 从而提高 Cu-Ti 合金的耐热性。杨春秀等[16]研究了 Zr 对 Cu-4Ti-0.05RE (wt%)组织和性能的影响, 研究发现 Zr 元素对 Cu-Ti 合金具有明显的细化晶粒的作用, 并可以抑制合金淬火态过程中的调幅分解过程。杨春秀等还发现, Cu-Ti 合金发生过时效时 Zr 元素汇聚在 Cu-Ti 合金不连续析出层状组织的前沿, 从而阻碍晶界的移动, 减缓胞状反应的进行, 增大片状组织生长的阻力, 进而推迟 Cu-Ti 合金的过时效, 提高了 Cu-Ti 合金的耐热性。

**Co 元素:** Nagarjuna 等[17]系统研究了不同含量的 Co 添加到 Cu-Ti 中对合金组织和性能的影响, 结果表明添加 Co 元素使 Cu-4.5Ti (wt%)合金中形成  $\text{Ti}_2\text{Co}$  和  $\text{TiCo}$  金属间化合物。并且由于 Co 与 Ti 形成的  $\text{TiCo}$  金属间化合物对合金强度的增加低于固溶时合金元素的固溶强化和源于  $\beta'$ - $\text{Cu}_4\text{Ti}$  的析出强化效果。随着 Co 含量的增加, 固溶态和时效态合金的强度同时降低。同时由于 Co 与 Ti 形成  $\text{TiCo}$  金属间化合物, 限制了固溶过程中晶粒的长大, 因此 Co 元素的加入有着明显的细晶效果。并且 Co 元素的加入使得 Cu-4.5Ti (wt%) 合金峰时效温度和时效时间同时降低。Batra 等[18]研究了 Co 对 Cu-Ti 合金的组织 and 性能的影响, 结果表明 Co 抑制了固溶态合金淬火过程中的调幅分解。Co 元素和 Ti 可通过空位交换机制进入铜晶格, 其中 Co 在铜中的扩散速率小于 Ti 在 Cu 基体中的扩散速率, 因此添加 Co 会降低 Ti 在 Cu-Ti-Co 三元合金中的扩散速率, 从而抑制了淬火态合金中调幅分解过程。

**B 元素:** Semboshi 等[19]研究了 B 对 Cu-Ti 合金组织与性能的影响, 研究发现固溶态合金淬火后 70% 的 B 元素聚集在晶界处, 位于晶界处的 B 元素抑制晶界不连续析出。B 元素的加入还抑制晶界处  $\beta$ - $\text{Cu}_4\text{Ti}$  的不连续析出, 从而减少 Cu-Ti 合金的晶间裂纹萌生和扩展可能性, 最终提高 Cu-Ti-B 合金的延展性。此外, B 元素的加入可以有效提高合金的硬度, 而对导电性能影响较小。

**Sn 元素:** Lebreton 等[20]通过研究不同 Ti、Sn 含量的 Cu-Ti-Sn 合金的组织与性能, 研究发现 Cu-Ti-Sn 铸态合金中含有  $\text{CuTi}_3\text{Sn}_5$  相。在时效早期, 在 Cu-2Ti-2.75Sn (wt%)合金中可观察到调幅分解组织, 而在 Cu-3Ti-2.75Sn (wt%)和 Cu-4Ti-2.75Sn (wt%)却未能观察到调幅分解组织。陈春宇等[21] [22]研究了 Cu-Ti-Sn 合金在铸态时存在  $\text{CuTi}_3\text{Sn}_5$  相, 随着 Ti 含量的增大,  $\text{CuTi}_3\text{Sn}_5$  在晶界会由连续析出向不连续析出转变。在时效时, 随着 Sn 含量的增大,  $\text{CuTi}_3\text{Sn}_5$  析出相的形状会由点状向针状转变。由于 Sn 与 Ti 元素形成金属间化合物  $\text{CuTi}_3\text{Sn}_5$ , 降低了时效处理后 Cu 基体中的 Ti 元素残留量, 从而使得 Cu-Ti-Sn 合金具有较高的导电性能。



Ni 和 Si 元素: 刘佳等[23] [24]系统研究了 Ni 含量对 Cu-Ti 合金组织与性能的影响, 研究发现 Cu-Ti 合金中加入 Ni 元素后铸态 Cu-Ti-Ni 合金中出现 NiTi 金属间化合物, 并且由于 Ni 元素的加入使铸态 Cu-Ti 合金组织由柱状晶向等轴晶转变。同时, Ni 元素的可提高时效态 Cu-Ti-Ni 合金的导电性能, 但是降低了合金的强度。刘佳等[25]还研究了冷轧及元素 Si 的添加对 Cu-Ti-Ni 合金组织与性能的影响, 在铸态时 Si 元素均的分布在 Cu 基体中, Ni 与 Ti 形成 Ni<sub>2</sub>Ti 和 NiTi 金属间化合物。时效处理后, 正交结构的 Ni<sub>2</sub>Si、单斜结构的 Ni<sub>3</sub>Si 和六方结构 Ni<sub>3</sub>Ti 相可从 Cu 基体中析出。随着冷轧程度的增加, Ni<sub>3</sub>Ti 相逐渐从条状向球形转变。刘佳等[26]还研究了深冷处理对 Cu-Ti-Ni 合金的组织与性能的影响, 深冷处理后合金的晶粒得到细化。深冷处理后基体中的 Ni<sub>3</sub>Ti 相以针状析出, Ni<sub>3</sub>Ti 相周围位错密度增大, 促进了基体中位错线向位错环的转变。同时深冷处理后, Cu-Ti 合金的晶界、位错和晶体表面处的空位消失。但是由于细晶对电子散射作用的增强与空位的减少对电子散射作用的减弱相互抵消, 因此深冷处理对 Cu-3Ti-5Ni (wt%)合金的导电率影响很小。

Al 元素: Konno 等[27]研究了添加 Al 对 Cu-Ti-Al 合金的影响, 研究发现时效早期并未发生与 Cu-Ti 合金相类似的调幅分解的发生。Konno 等认为合金元素 Al 在基体中形成的高度共格的团簇降低了 Ti 元素的化学势, 从而阻止了系统中调幅分解的发生。时效过程中, 基体可以析出 AlCu<sub>2</sub>Ti 相, Cu-Ti-Al 合金的导电性能比 Cu-Ti 二元合金得到较大提高。孙晓春[28]研究发现 Cu-3Ti-1Al (wt%)合金的铸态组织主要由  $\alpha$ -Cu (Ti, Al) + Ti<sub>3</sub>Al 金属间化合物组成, 时效析出过程中 Ti<sub>3</sub>Al、 $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti 和  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti 的脱溶沉淀降低了 Cu 基体 Ti 元素的含量, 从而提高了 Cu-3Ti-1Al (wt%)合金的导电性能。同时, 添加 Al 可以抑制 Cu-Ti 合金的平衡相在晶界、孪晶界、位错和其他缺陷处的不均匀形核。

Mg 元素: 冉倩妮等[29] [30] [31]研究了添加不同含量的 Mg 对 Cu-3Ti (wt%)合金的性能的影响, 结构表明: Cu-Ti-Mg 合金时效后会从基体中析出拓扑密排结构的 Cu<sub>2</sub>Mg 和  $\beta'$ -Cu<sub>4</sub>Ti 相, 从而提高了铸态和时效态的 Cu-Ti-Mg 合金的导电性能与力学性能。

### 3. Cu-Ti 合金的制备工艺及性能

由于 Ti 在高温下化学性质较为活泼, 易与多种元素及化合物发生反应, O<sub>2</sub> 在 650℃ 以上时将向 Ti 中扩散形成一层坚硬的氧化层, N<sub>2</sub> 在 700℃ 以上时则与 Ti 形成 TiN, 并且熔炼过程中将会发生吸氧、吸气、金属夹杂物等一系列熔炼问题, 因此铜钛合金的制备多在真空条件下制备。目前通过真空熔炼的方法生产钛青铜已经相对成熟, 但是由于真空熔炼时熔炼室需要很高的真空度, 因此难以进行合金熔体成分的测量、调整和扒渣等操作。目前对于熔炼原材料及杂质含量的控制要求很高, 并且真空炉一般只能进行小批量的生产, 生产成本较高, 难以满足工业大规模连续生产的要求, 因此如何在真空下高效且低成本的制备 Cu-Ti 合金铸锭是目前急需解决的一个问题。同时, 由于 Ti 元素较强的化学活性, 因此熔炼 Cu-Ti 合金较其他合金条件更为苛刻。

无论采取真空或者非真空的方式熔炼, 或者采用粉末冶金的方式制备, 控制 Ti 元素的损耗率, 减少制备过程中缺陷的形成是获得高性能的关键。对于 Cu-Ti 合金的研究目前主要是通过添加微合金化元素和改进形变热处理工艺, 常见的热处理制备工艺为: 固溶处理 + 冷轧 + 时效 + 冷轧 + 时效等, 从而调控材料的各项物理性能。目前国内文献报道的 Cu-Ti 系合金的主要性能如表 1 所示。

Cu-Ti 合金的 Ti 含量一般控制在 1~6.5 wt%, 可适当添加 Cr、Ni、Si、Co、Mg 等元素, 合金的抗拉强度和屈服强度随着 Ti 含量的增加而长大, 但同时其塑性和断后伸长率减低, 电导率也降低。目前获得的 Cu-Ti 系合金的物理性能为: 最大抗拉强度为 520~1450 MPa, 屈服强度为 438~1400 MPa, 断后伸长率为 1.5%~25.1%, 电导率为 4.8%~33.8% IACS。Cu-Ti 合金(Ti: 1~5 wt%; 1~6 at%)经过微合金化和形变热处理后, 获得 Cu-Ti 合金的机械和物理性能与广泛使用的铍青铜基本相当。同时, 钛青铜具有较高的抗拉强度、硬度和弹性极限, 兼具良好的耐疲劳性能、耐腐蚀性能、摩擦磨损性能和折弯性能, 同时还拥

有一定的导电导热性能。同时,钛青铜材料在生产过程中的冷加工性能较好,易于焊接加工及电镀处理,具有灭弧性能。因此国外生产的钛青铜已经广泛用于兼具高强度、高弹性和高耐磨性的弹性导电元件。作为一种超高强度导电材料,钛铜合金已经在诸如导电弹簧、互连器等应用中取代了传统的 Cu-Be 合金。目前日本 DOWA METALTECH 公司生产的牌号 YCuT 和 JX 金属株式会社牌号 C1990,以及牌号 NKT322、NKT180 合金已经商用。其中 C1990 牌号合金折弯性和强度优秀,折弯性超过以往生产的钛青铜,合金拥有较好的抗应力松弛性能,适用于制造电池端子、天线端子和 SIM 卡连接器等。NKT322 牌号合金的抗拉强度高于 1 GPa,折弯加工性能良好,已经应用于制造电池端子、系统 I/O 连接器和插口等。YCuT 牌号合金则已经用于制造需要高寿命以及高接触应力的开关和连接器等元件。

**Table 1.** Chemical composition, preparation process and physical properties of reported Cu-Ti alloys [13] [14] [15] [29] [32]-[39]

**表 1.** 报道的 Cu-Ti 合金的成分、制备工艺及其相关物理性能[13] [14] [15] [29] [32]-[39]

合金成分	制备工艺	电导率 %IACS	硬度 HV	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	伸长率%
Cu-4Ti-1Cr	860℃固溶 + 90%冷变形 + 400℃/1h	/	416	1248	1165	1.5
Cu-3Ti-1Cr	860℃固溶 + 90%冷变形 + 400℃/1h	/	373	1110	1090	2.5
Cu-3.38Ti-0.11Zr	850℃固溶 + 450℃/6h	16.8	350.2	1129	/	5.9
Cu-3Ti-2Mg	700℃固溶 + 60%冷变形 + 450℃/2h	16.7	328	/	/	/
Cu-3Ti-0.2Fe-0.2Cr	900℃固溶 + 97.8%冷变 + 450℃/2h	12.7	355.1	1053	951	2.2
Cu-3Ti-0.2Fe-0.2Cr	900℃固溶 + 50%冷轧 + 450℃/4h + 95%冷 + 450℃/1.5h	17.1	354.6	1062	968	1.9
Cu-2.7Ti-0.15Mg-0.1 Ce-0.1Zr	850℃固溶 + 90%冷变形 + 400℃/4h	15.4	322	971	909	3.8
Cu-2.7Ti-0.15Mg-0.1 Ce-0.1Zr	850℃固溶 + 450℃/8h + 90%冷变形 + 400℃/4h	20.1	340	1035	982	3.2
Cu-3Ti-3Ni-0.5Si	850℃固溶 + 90%冷变 + 500℃/0.5h	33.79	268	615	/	25.1
Cu-3Ti-1Cd	860℃固溶 + 450℃/72h	13	288	785	643	24
Cu-4Ti-1Cd	860℃固溶 + 450℃/40h	10.1	318	894	751	18
Cu-1.5 Ti	900℃固溶 + 450℃/16h	23	210	520	438	23
Cu-1.5 Ti	900℃固溶 + 90%冷变形 + 400℃/6h	24.5	280	760	670	9
Cu-2.7Ti	900℃固溶 + 450℃/16h	17	275	680	460	22
Cu-2.7Ti	900℃固溶 + 90%冷变形 + 400℃/1h	12	355	1000	950	3.5
Cu-5.4Ti	900℃固溶 + 450℃/16h	10.8	366	930	790	15
Cu-5.4Ti	900℃固溶 + 90%冷变形 + 400℃/1h	4.8	455	1450	1400	1.5
Cu-4.5Ti	900℃固溶 + 450℃/16h	11.3	340	890	700	20
Cu-4.5Ti	900℃固溶 + 90%冷变形 + 400℃/1h	8	425	1380	1280	2
Cu-4.5Ti-0.5Co	900℃固溶 + 450℃/16h	8	320	890	710	25
Cu-4.5Ti-0.5Co	900℃固溶 + 90%冷变形 + 400℃/1h	9	430	1350	1185	3

#### 4. 结语

铜钛合金作为一种具有替代铜铍合金潜力的高性能铜合金材料。铜钛合金具有超高的强度、高弹性

模量、高弯折性能和高的应力松弛性能。但该合金的导电性能较低，因此，对于铜钛合金将来的研究方向是通过合理添加第三组元或者更多组元使得铜钛合金在保证其超高强度的同时提升其导电性能。同时，目前国内的铜钛合金的制备方法仍然以真空熔炼为主，而在非真空熔炼制备上尚未取得突破，这制约了该合金的国产化及规模量产。随着我国由工业大国向工业化强国的迈进，国内对超高强弹性导电材料的需求与日俱增，因此加快我国铜钛合金的国内自主生产并替代进口已迫在眉睫。

## 致 谢

论文作者感谢国家重点研发计划等多个项目的支持。

## 基金项目

国家重点研发计划(No.2018YFE0306100)、国家自然科学基金(No.51901250)和湖南省自然科学基金(No.2019JJ50765)。

## 参考文献

- [1] Nagarjuna, S. and Srinivas, M. (2005) Elevated Temperature Tensile Behaviour of a Cu-4.5Ti Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **406**, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.06.064>
- [2] Suzuki, S., Hirabayashi, K., Shibata, H., et al. (2003) Electrical and Thermal Conductivities in Quenched and Aged High-Purity Cu-Ti Alloys. *Scripta Materialia*, **48**, 431-435. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00441-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00441-4)
- [3] Soffa, W.A. and Laughlin, D.E. (2004) High-Strength Age Hardening Copper-Titanium Alloys: Redivivus. *Progress in Materials Science*, **49**, 347-366. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(03\)00029-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(03)00029-X)
- [4] Nagarjuna, S., Balasubramanian, K. and Sarma, D.S. (1997) Effect of Ti Additions on the Electrical Resistivity of Copper. *Materials Science and Engineering A*, **225**, 118-124. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(96\)10578-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(96)10578-5)
- [5] 张楠, 李振华, 姜训勇, 等. Ti 含量对 Cu-Ti 合金时效过程的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(3): 36-40.
- [6] Cornie, J.A., Datta, A. and Soffa, W.A. (1973) An Electron Microscopy Study of Precipitation in Cu-Ti Sideband Alloys. *Metall Trans*, **3**, 727-733. <https://doi.org/10.1007/BF02643081>
- [7] Datta, A. and Sofia, W.A. (1976) The Structure and Properties of Age Hardened Cu-Ti Alloys. *Acta Metall*, **24**, 987-1001. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(76\)90129-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(76)90129-2)
- [8] Woychik, C.G., Rioja, R.J., Massalski, T.B., et al. (1985) Decomposition of Rapidly Solidified Cu-Ti Solid Solutions. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **7**, 1353-1354. <https://doi.org/10.1007/BF02670339>
- [9] 卫英慧, 王笑天. Cu-Ti 合金时效早期相变规律的研究[J]. 电子显微学报, 1997(2): 40-45.
- [10] 卫英慧, 王笑天. Cu-4%Ti 合金胞状反应的研究[J]. 西安交通大学学报, 1997, 31(3): 49-52 + 64.
- [11] 卫英慧, 王笑天. Cu-4Ti 合金调幅分解的 TEM 研究[J]. 稀有金属材料与工程, 1997(3): 5-8.
- [12] Markandeya, R., Nagarjuna, S. and Sarma, D.S. (2004) Precipitation Hardening of Cu-Ti-Cr Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **371**, 291-305. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.002>
- [13] Markandeya, R., Nagarjuna, S. and Sarma, D.S. (2005) Effect of Prior Cold Work on Age Hardening of Cu-4Ti-1Cr Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **404**, 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.05.072>
- [14] Markandeya, R., Nagarjuna, S. and Sarma, D.S. (2006) Effect of Prior Cold Work on Age Hardening of Cu-3Ti-1Cr Alloy. *Materials Characterization*, **57**, 348-357. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.02.017>
- [15] 曹兴民, 李华清, 向朝建, 等. Zr 的加入对 Cu-Ti 合金耐热性能影响的研究[J]. 热加工工艺, 2008(14): 16-18.
- [16] 杨春秀, 汤玉琼, 郭富安, 等. Zr 对 Cu-4Ti-0.05RE 合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(S1): 266-270.
- [17] Nagarjuna, S. and Sarma, D.S. (2002) Effect of Cobalt Additions on the Age Hardening of Cu-4.5Ti Alloy. *Journal of Materials Science*, **37**, 1929-1940. <https://doi.org/10.1023/A:1015278610543>
- [18] Batra, I.S., Laik, A., Kale, G.B., et al. (2005) Microstructure and Properties of a Cu-Ti-Co Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **402**, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.04.015>
- [19] Semboshi, S., Ikeda, J., Iwase, A., et al. (2015) Effect of Boron Doping on Cellular Discontinuous Precipitation for Age-Hardenable Cu-Ti Alloys. *Materials*, **8**, 3467-3478. <https://doi.org/10.3390/ma8063467>



- [20] Lebreton, V., Pachoutinski, D. and Bienvenu, Y. (2009) An Investigation of Microstructure and Mechanical Properties in Cu-Ti-Sn Alloys Rich in Copper. *Materials Science and Engineering: A*, **508**, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.01.050>
- [21] 陈春宇. Cu-Ti-Sn 导电弹性合金的组织与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2014.
- [22] Wang, X.H., Chen, C., Guo, T.T., *et al.* (2015) Microstructure and Properties of Ternary Cu-Ti-Sn Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **24**, 2738-2743. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1483-4>
- [23] Liu, J., Wang, X.H., Guo, T.T., *et al.* (2015) Microstructure and Properties of Cu-Ti-Ni Alloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, **22**, 1199-1204. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1185-9>
- [24] 刘佳, 王献辉, 冉倩妮, 等. 时效态 Cu-3Ti-1Ni 合金的组织与性能[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2016, 26(12): 3183-3188.
- [25] 刘佳, 王献辉, 郭婷婷, 等. 时效处理对 Cu-3Ti-3Ni 合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程(英文版), 2016, 45(5): 1162-1167.
- [26] 刘佳, 王献辉, 冉倩妮, 等. 深冷处理对 Cu-3Ti-5Ni 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(11): 160-164.
- [27] Konno, T.J., Nishio, R., Semboshi, S., *et al.* (2008) Aging Behavior of Cu-Ti-Al Alloy Observed by Transmission Electron Microscopy. *Journal of Materials Science*, **43**, 3761-3768. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2233-2>
- [28] 孙晓春. Cu-3Ti-1Al 合金的组织及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- [29] 冉倩妮. Cu-Ti-Mg 导电弹性铜合金的组织与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [30] 刘佳, 王献辉, 冉倩妮, 等. Cu-3Ti-2Mg 合金的时效特征[J]. 稀有金属材料与工程(英文版), 2018, 47(7): 1980-1985.
- [31] Li, C., Wang, X.H., Li, B., *et al.* (2020) Effect of Cold Rolling and Aging Treatment on the Microstructure and Properties of Cu-3Ti-2Mg Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **818**, Article ID: 152915. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152915>
- [32] 董亚光. 高强导电 Cu-Ti-Fe-Cr 合金箔的时效行为研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [33] Li, S., Li, Z., Zhu, X., *et al.* (2016) Microstructure and Property of Cu-2.7Ti-0.15Mg-0.1Ce-0.1Zr Alloy Treated with a Combined Aging Process. *Materials Science & Engineering A*, **650**, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.062>
- [34] Liu, J., Wang, X.H., Chen, J., *et al.* (2019) The Effect of Cold Rolling on Age Hardening of Cu-3Ti-3Ni-0.5Si Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **797**, 370-379. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.091>
- [35] Markandeya, R., Nagarjuna, S. and Sarma, D.S. (2004) Precipitation Hardening of Cu-4Ti-1Cd Alloy. *Journal of Materials Science*, **39**, 1579-1587. <https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000016155.64776.52>
- [36] Markandeya, R., Nagarjuna, S. and Sarma, D.S. (2007) Precipitation Hardening of Cu-3Ti-1Cd Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **16**, 640-646. <https://doi.org/10.1007/s11665-007-9082-7>
- [37] Nagarjuna, S., Balasubramanian, K. and Sarma, D.S. (1997) Effect of Prior Cold Work on Mechanical Properties and Structure of an Age-Hardened Cu-1.5 wt.% Ti Alloy. *Journal of Materials Science*, **32**, 3375-3385. <https://doi.org/10.1023/A:1018608430443>
- [38] Nagarjuna, S., Balasubramanian, K. and Sarma, D.S. (1999) Effect of Prior Cold Work on Mechanical Properties, Electrical Conductivity and Microstructure of Aged Cu-Ti Alloys. *Journal of Materials Science*, **34**, 2929-2942. <https://doi.org/10.1023/A:1004603906359>
- [39] Nagarjuna, S., Sharma, K.K., Sudhakar, I., *et al.* (2001) Age Hardening Studies in a Cu-4.5Ti-0.5Co Alloy. *Materials Science and Engineering A*, **313**, 251-260. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01834-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01834-7)