

澳洲幸运澳洲幸运五五

EMCm7DuGMf9lBRLV

澳洲幸运澳洲幸运五五科学家提出新型铜钽锂合金，强度媲美超合金

材料科学领域一直存在一个基本挑战：如何在一种材料中结合高导电导热性与优异的高温结构强度？铜及其合金拥有出色的导电导热性能，但在高温下容易软化、失去强度。而镍基或钴基等超合金虽然能在极端温度下保持强度，导电导热性却相对较差，且通常更重、加工更难。寻找能够兼顾两者优点的材料，一直是研究人员努力的方向。

近期，一项由美国陆军研究实验室（ARL，Army Research Laboratory）和理海大学（Lehigh University）主导，联合亚利桑那州立大学与路易斯安那州立大学科学家的研究，在这一领域取得了重要进展。他们开发出一种新型的纳米结构铜合金，能够在保持铜良好导电导热性的同时，在高温下展现出接近甚至优于某些传统超合金的机械强度和热稳定性。这项研究成果发表于 *Science*，介绍了一种铜-钽-锂（Cu-Ta-Li）三元合金。独特的微观结构设计，使其成为一种非常坚韧的铜基材料，可能为航空航天、国防及先进工业领域的高温应用带来新的选择。

图 | 相关论文（来源：Science）

理海大学阿尔科基金会材料科学与工程荣休教授、论文共同通讯作者 Martin Harmer 对媒体表示：“这是一项前沿科学工作。我们开发的新材料将铜的优良导电性与类似镍基超合金的强度和耐久性结合起来。这为工业界和军事领域开发用于高超声速和高性能涡轮发动机的新材料提供了基础。”

微观结构创新的力量

这种新型合金的原子百分比成分约为 96.5% 的铜（Cu）、3% 的钽（Ta）和 0.5% 的锂（Li）。其性能的关键在于一种基于“界面相稳定化纳米结构”（Complexion-Stabilized Nanostructure）的设计思路，这是理海大学研究人员早期提出的概念。

要理解其创新之处，需要先了解传统金属材料在高温下的局限。金属通常由微小晶粒构成，晶粒间的边界（晶界）在高温下会发生迁移，导致晶粒长大，材料强度随之下降。铜由于熔点相对较低（约 1085°C），在高温下尤其容易发生这种变化。

研究团队利用了锂和钽的特性。锂在铜中有一定溶解度，能形成金属间化合物。钽则几乎不溶于铜。当微量的锂（0.5 at%）被引入铜-钽（Cu-Ta）体系后，形成了纳米尺度的 Cu_3Li （三铜化锂）沉淀相。这种沉淀相具有有序的 L1_2 晶体结构，与镍基超合金中起主要强化作用的 γ' 相（通常为 Ni_3Al 或 Ni_3Ti ）结构类型相同，这为其提供了高强度的潜力。

然而，仅有沉淀相是不够的，关键在于钽（Ta）的作用。通过高角度环形暗场扫描透射电子显微镜等先进技术观察，研究人员发现在 Cu_3Li 沉淀相与铜（Cu）基体的界面处，形成了一层富含钽原子的、厚度仅为原子级别的特殊界面结构——研究者称之为“界面相”（Complexion）。这个富钽原子层像一层薄壳包裹着 Cu_3Li 纳米沉淀相。

（来源：Science）

这种“界面相”并非传统意义上的独立物相，而是一种稳定存在的界面结构层。它的存在起到了重要的稳定作用。首先，它显著增强了 Cu_3Li 沉淀相与铜基体之间的界面结合。密度泛函理论计算表明，有钽界面相存在的界面结合强度（以理想分离功衡量）是无界面相时的三倍，界面能也大幅降低。这意味着界面更稳定，沉淀相不易溶解或粗化。

图 | 电子和结构性质的密度泛函理论模拟（来源：Science）

其次，这层富钽界面相有助于维持 Cu_3Li 沉淀相与铜基体之间的高度共格关系。尽管两者晶格常数存在约 14.3% 的差异，远小于 Cu-Ta 二元合金中 Ta 沉淀相与 Cu 基体的错配度（约 22.7%），但在钽界面相的调节下，界面处并未观察到位错，沉淀相保持了与基体晶格取向一致的立方体形态。这种共格关系有助于降低界面能，并能有效阻碍位错滑移，从而提高材料强度。

更重要的是，钽具有非常高的熔点（约 3020°C），意味着钽原子在高温下扩散极其缓慢。这层富钽界面相如同一个屏障，有效抑制了 Cu_3Li 沉淀相在高温下的溶解和长大，同时也限制了铜基体晶粒的粗化。相比于传统金属中高温下易于迁移的晶界，这种界面相稳定化的纳米结构在高温下表现出更好的结构稳定性。

研究人员指出，这种微观结构与镍基超合金中的 γ/γ' 结构在原理上有相似之处。两者都是通过在基体中弥散分布具有特定结构、与基体保持共格或半共格关系的强化相来获得优异的高温性能。Cu-Ta-Li 合金的设计，是在铜基体中实现了一种类似的强化机制。

从粉末到高性能材料

实验结果显示，其独特的微观结构赋予了 Cu-Ta-Li 合金显著的性能。室温下，其屈服强度达到约 1120 兆帕（MPa），超过 1 吉帕（GPa）。这一数值远高于普通结构钢（通常 250-500MPa），也高于多数铜合金，接近一些高强度钢和镍基超合金的水平。与同样具有高强度的铜铍合金（如 C17200 约 1200-1300MPa）相比，Cu-Ta-Li 合金不含铍，避免了相关的成本和潜在健康风险。

其高温性能尤为突出。在 800°C（约为铜熔点的 0.8 倍）下进行的长达 10,000 小时（超过一年）的退火测试中，该合金的屈服强度仅从 983MPa 下降至 947MPa，降幅约 4%，显示出良好的热稳定性。作为对比，Cu-3Ta 二元合金在相同条件下强度下降了 20%，降至约 800MPa，并伴有明显的晶粒粗化。Cu-Ta-Li 合金则基本维持了其纳米晶结构。这种在接近熔点的高温下长时间保持强度和微观结构稳定性的能力，对铜合金而言是一个重要的突破。此外，在高温蠕变测试中，Cu-Ta-Li 合金在特定条件下也表现出比 Cu-Ta 二元合金更好的抗蠕变性。

（来源：Science）

总的来说，Cu-Ta-Li 合金在保持铜基材料高导电/导热潜力的同时，实现了高水平的高温强度、热稳定性和抗蠕变性。研究者也说明，它并非旨在全面替代传统超合金，特别是在超合金使用温度的上限区域，但它为那些需要结合导热/导电与高温承载能力的应用提供了一种有潜力的新材料选择，扩展了铜合金的应用可能性。

那么，这种性能出色的合金究竟是如何制备的呢？

具体来说，其制备采用了粉末冶金和高能低温球磨技术。粉末冶金是将金属粉末混合、压制成型并烧结的过程。高能低温球磨则是在液氮低温下，利用高能机械力强制混合通常不互溶的元素（如铜和钽）粉末，并细化晶粒至纳米尺度。研究者认为，这个过程可能使钽过饱和固溶于铜中，随后的热处理（退火）促使了 Cu_3Li 沉淀相和富钽界面相的形成。

合成之后，研究团队运用了多种表征技术以深入理解合金的结构与性能。他们使用高角度环形暗场扫描透射电子显微镜在原子尺度上观察合金的微观结构，特别是沉淀相的形态、尺寸和分布。借助原子分辨率显微镜，他们获得了原子级别的图像，为理解合金优异性能的微观机制提供了关键证据。

为了精确探知合金内部纳米尺度的三维原子分布和化学成分，团队采用了原子探针层析成像（APT, Atom Probe Tomography）技术，确认了 Cu_3Li 沉淀相的化学成分及其内部的原子有序排列，以及富钽界面相的存在。在宏观性能验证方面，他们进行了长达 10,000 小时的高温稳定性测试和高温蠕变测试。同时，为了从理论层面解释实验现象，他们还运用了密度泛函理论计算，揭示了富钽界面相稳定 Cu_3Li 沉淀相的物理机制。这些方法的综合运用，使得研究人员能够理解并优化这种新材料。

图 | Cu-3Ta-0.5Li 的 APT 结果（来源：Science）

重塑高温材料格局

Cu-Ta-Li 合金的特性使其在多个技术领域具有应用潜力。

航空航天与国防是其最受关注的应用方向。高超声速飞行器、先进导弹和高性能涡轮发动机等装备中的一些部件，既要承受高温高应力，又需要高效散热。该合金的高温强度和良好的导热性，使其可能适用于制造热交换器、热管理部件、推进系统零件等。这可能有助于提高发动机的工作温度和效率，或延长部件寿命。美国陆军研究实验室已为该合金申请并获得了美国专利（US 11,975,385 B2）。

在能源领域，例如聚变能装置中需要耐受高温和高热负荷的材料，高性能铜合金一直是研究重点之一。此外，需要更高工作温度以提升效率的先进发电技术，也可能从这种兼具强度和导热性的材料中获益。

在先进工业应用方面，需要高效散热同时承受一定机械载荷的场合，如高性能电子器件的散热部件、高功率电连接器（尤其是在需要弹性的场合，可考虑替代铜钼合金），以及某些特殊工况下的热交换设备等，都可能成为其潜在应用场景。

另外，考虑到铜本身的抗菌性，虽然高温应用通常不主要考虑此特性，但在某些需要结合强度和抗菌性的特殊应用中（如特定医疗器械或食品处理设备），这种高强度铜合金也可能提供一种选择，但这需要进一步评估合金化对其抗菌性能的影响及成本效益。

尽管 Cu-Ta-Li 合金显示出良好的前景，但从实验室研究走向广泛的工业应用，还需要解决一些实际问题并开展进一步研究。

首先是成本和规模化生产。钽是一种价格较高的金属，虽然其在合金中含量不高（3 at%），但仍会增加原材料成本。高能低温球磨工艺能否经济高效地进行大规模生产，也是一个关键因素。这可能意味着该合金初期更适合用于那些对性能要求极高、现有材料无法满足需求的领域，而非作为低成本替代品。

而且，钽目前的主要产地刚果民主共和国和卢旺达的政治局势并不稳定，很可能影响其供应稳定。虽然巴西、中国、尼日利亚、澳大利亚等地也有钽矿资源，且正在努力扩大生产，但还数量需要进一步提高。

（数据来源：US Geological Survey）

此外，关于 Cu-Ta-Li 合金的其他力学性能，以及加工性能和市场化潜力还有待进一步的研究。

该团队未来的研究方向将聚焦于直接测量其热导率，开展更全面的性能评估，探索将其“界面相稳定化”设计策略应用于开发其他高温合金的可能性，并持续优化制造工艺以降低成本和提高可扩展性。

参考资料：

1.<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adr0299>

2.<https://news.lehigh.edu/new-material-gives-copper-superalloy-like-strength-0>

运营/排版：何晨龙

168飞艇官网开奖结果记录直播

澳洲幸运10计划/官网机灵系统

大发快三app下载官网

时时采彩app官方正版

澳洲10开奖结果记录

澳洲幸运10稳赢图

168澳洲幸运10开奖历史查询

澳洲10记录

澳洲幸运10官方是谁

澳洲幸运10能不能控制

澳洲幸运5全国开奖官网

2023澳洲幸运5开奖官网

澳州5计划

168极速赛车官网开奖历史结果

澳洲幸运10赛车公式怎么分析

澳洲10计划预测

澳洲幸运10怎么玩才不输呢

澳洲幸运10真实吗

澳洲幸运5五位走势图