

高性能铜合金研究现状及发展趋势

李龙健¹ 于风云² 李仁庚³ 张斯若¹ 康慧君¹ 王同敏¹

(1.大连理工大学辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室; 2.大连理工大学材料测试分析中心;
3.南京工业大学先进轻质高性能材料研究中心)

摘 要 从铜合金材料的性能需求出发,系统阐述了高性能铜合金的发展历程、研究现状及未来发展方向。以铜合金服役性能为主线,介绍了铜合金强度、导电性、耐热性和耐磨性等影响因素、调控机理及相互作用机制。总结了高强高导铜合金、高耐热铜合金和高耐磨铜合金的制备方法和强化机理,为新型高性能铜合金的设计与制备提供参考。

关键词 高强高导铜合金;耐热性;耐磨性;服役性能

中图分类号 TG146.1⁺1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress and Development Trend of High-Performance Cu Alloys

Li Longjian¹, Yu Fengyun², Li Rengeng³, Zhang Siruo¹, Kang Huijun¹, Wang Tongmin¹

(1.Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology, Dalian University of Technology; 2.Center of Material Testing and Analysis's, Dalian University of Technology;
3.Key Laboratory for Light-weight Materials, Nanjing Technology University)

Abstract: The development history, research progress and development direction of high-performance copper alloy were systematically described based on the performance requirement. The influencing factors, regulating mechanism and interaction mechanism of copper alloy, such as strength, electrical conductivity, heat resistance and wear resistance were introduced. The fabrication methods and strengthening mechanism of copper alloy with superior comprehensive properties were summarized, providing ideas for the design and fabrication of new high-performance copper alloy.

Key Words: Superior Copper Alloy, Heat Resistance, Wear Resistance, Service Performance

收稿日期:2020-09-16;修改稿收到日期:2020-09-28

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51525401);国家自然科学基金资助项目(51774065,51971052)

第一作者简介:李龙健,男,1996 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail: lilongjian@mail.dlut.edu.cn

通信作者:康慧君,男,1982 年出生,副教授,辽宁大连(116024),E-mail: kanghuijun@dlut.edu.cn

引用格式:李龙健,于风云,李仁庚,等. 高性能铜合金研究现状及发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):293-298.

LI L J, YU F Y, LI R G, et al. Research progress and development trend of high-performance Cu alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021,41(3):293-298.

[31] MOHAMMAD M A, SATISH K A, ASHWANI P. Potentials of copper slag utilisation in the manufacture of ordinary Portland cement[J]. Thomas Telford Ltd., 2013, 25(4): 208-216.

[32] TAEB A, FAGHIHI S. Utilization of copper slag in the cement industry[J]. Zkg International, 2002, 55(4): 98-100.

[33] COLLINS R J, CIESIELSKI S K, MASON L S. Recycling and Use of Waste Materials and By-products in Highway Construction [M]. Washington, DC: Transportation Research Board, 1994.

[34] EMERY J J. Slag Utilization in Pavement Construction, Extending Aggregate Resources[M]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1982.

[35] 纵振海,肖其中,卫耕,等. Cu 渣砂磨料的生产与应用[J].水泥工程, 2005(6): 83-84.

[36] 张启,蒋守鹏. 一种利用炼 Cu 炉渣生产除锈磨料的方法,中国: CN1196377[P].1998-10-21.

[37] LI H, ZHANG W, WANG J, et al. Copper slag as a catalyst for mercury oxidation in coal combustion flue gas[J]. Waste Management, 2018, 74: 253-259.

[38] HUANOSTA G T, DANTAS R F, RAMIREZ-ZAMORA R M, et al. Evaluation of copper slag to catalyze advanced oxidation processes for the removal of phenol in water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 213-214(4): 325-330.

[39] ZEYNOLABEDIN R, MAHANPOOR K. Preparation and characterization of nano-spherical CoFeO supported on copper slag as a catalyst for photocatalytic degradation of 2-nitrophenol in water [J]. Journal of Nanostructure in Chemistry, 2017, 7(1): 67-74.

[40] SINGH J, SINGH S P. Synthesis of alkali-activated binder at ambient temperature using copper slag as precursor[J]. Materials Letters, 2020, 262: 127 169.

[41] WEI R, YANG M, LV X. Preparing Ferrosilicon Alloy with Copper Slag[M]. Switzerland, Cham: Springer, 2017.

(编辑:刘晨辉)

高性能铜合金是用于引线框架、高铁接触线、火箭发动机燃烧室、核聚变装置、电磁炮等的关键材料之一^[1~3]。纯 Cu 是除 Ag 之外导电性和导热性最好的金属材料,但纯 Cu 的强度较低,仅为 230~290 MPa,难以满足工程部件的性能要求^[4]。强度和导电性本质上是相互矛盾的,一般来说提高铜合金强度的方法都会不可避免地自由电子造成散射,从而降低铜合金的导电性能^[5,6]。协同调控强度和导电性的关系成为高性能铜合金制备的重要研究课题。高强高导铜合金是一类同时具有良好强度和导电性的高性能铜合金,一般要求其强度 ≥ 600 MPa、电导率 ≥ 46.40 MS/m^[7]。高强高导铜合金工业应用需求较大,应用范围广^[8]。

高强高导铜合金的主要强化方式有细晶强化、形变强化、固溶强化和析出强化等,按照制备方法和强化机理可分为^[7]:①固溶强化+形变强化型铜合金;②析出强化+形变强化型铜合金;③弹性导电铜合金;④弥散强化+形变强化型铜合金;⑤纤维增强型铜基复合材料。单一的强化方式难以满足铜合金高强度的要求,细晶强化+形变强化、析出强化+形变强化等多种强化并存的方法可以在不明显损害导电性的基础上有效提高铜合金强度。KAPOOR G 等^[9]利用等径角挤压技术对 Cu-Cr-Zr 合金进行大塑性变形,并通过后续的轧制和时效处理,发现经过等径角挤压和低温轧制后,合金的位错密度显著增加。LIU Y 等^[10]采用两步轧制和中间时效的热机械处理方法成功制备出抗拉强度为 473 MPa、硬度(HV)为 140、电导率为 54.81 MS/m 的 Cu-Cr-Ag 合金。此外,研究还发现,纳米孪晶对电导率的影响较小,且能显著提高铜合金的强度。ZHAO W 等^[11]在液氮温度下通过动态塑性变形在合金中引入纳米形变孪晶,成功制备出了强度为 610 MPa、电导率为 55.10 MS/m 的块体纯 Cu 试样。LU L 等^[12]采用脉冲电沉积法制备出了纳米生长孪晶铜,其抗拉强度可达 1 068 MPa,电导率为 56.20 MS/m,与无氧 Cu 相当。总之,在以上的强化方式中,析出强化是制备高强高导铜合金最常见的方式。本课题将围绕析出强化型铜合金论述高性能铜合金的发展历程及研究现状。

高强度和高导电性已经不能满足铜合金工程部件的服役要求。如接触线的性能除了要具有一定的强度外还要求具有高的再结晶温度,良好的耐热性和耐磨性等;集成电路引线框架的性能要求除强度和导电性外还要具有较高的抗软化温度;在军工方面,电磁炮是一种新型武器,但作为电磁炮武器的主要部件,电磁导轨由于在高电流和磁场条件下服役,会受表面刨削、转折、电弧烧蚀和摩擦磨损等损伤,需要亟待解决以延长其使用寿命^[13];火箭发动机燃烧室以及聚变反应堆都对铜合

金的高温性能提出了更高的要求,服役环境更加恶劣^[14]。

1 析出强化型铜合金

集成电路引线框架和各种接触线铜合金要求材料具有高的强度和电导率,其中要求抗拉强度高于 600 MPa,电导率在 46.40 MS/m 左右。析出强化型铜合金是引线框架和接触线的主流候选合金体系,图 1 和图 2 分别为引线框架和高铁接触线的实物图。析出强化型铜合金的发展可分为 3 个阶段:①Cu-Fe-P 为主体的析出强化铜合金;②Cu-Ni-Si 为主体的析出强化铜合金;③Cu-Cr-Zr 系析出强化铜合金。



图 1 引线框架实物图^[15]

Fig.1 Object picture of lead frame

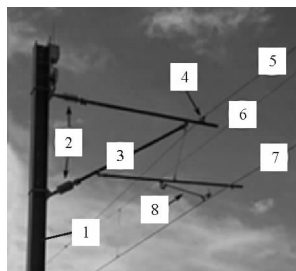


图 2 高铁接触线实物图^[16,17]

Fig.2 Object picture of high speed rail contact line

- 1.电杆 2.绝缘体 3.悬臂梁 4.支架 5.电缆吊线
6.吊索 7.接触线 8.轻型稳定臂

1.1 Cu-Fe-P 系合金

最早开发的 Cu-Fe-P 合金是 C19120 和 C19400 铜合金。由于 Fe-Ni 合金的导电性和导热性较差而不能满足需求,Cu-Fe-P 合金逐步取代 Fe-Ni 合金成为新型引线框架材料。Cu-Fe-P 合金的抗拉强度为 400~600 MPa,电导率为 34.80~46.40 MS/m,属于中强高导铜合金。虽然 Cu-Fe-P 合金的强度和电导率不是特别突出,但其具有加工性能好、耐腐蚀、抗疲劳及可在大气中熔炼等特点,适用于工业大批量生产。已有研究表明,在 Cu-Fe-P 合金体系中,主要析出相有 α -Fe、 γ -Fe、Fe₂P 和 Fe₃P 等^[18],由于析出相的形成使合金具有良好的强度和导电性平衡。如 Cu-0.7Fe-0.15P 铜合金多次冷轧后在 500 °C 时效时没有软化,表明其抗软化温度要

比 C19400 高。XIAO X P 等^[18]通过对 Cu-2.3Fe-0.03P 进行两步热机械处理,在铜基体中形成的细小 γ -Fe 和 Fe₃P 析出相提高了强度同时优化了电导率,最终获得的抗拉强度为 528 MPa,电导率为 37.12 MS/m。由此可见,Cu-Fe-P 合金性能优化主要是通过调控基体的微观组织和析出相的形貌和尺寸。稀土元素的添加可促进 Cu-Fe-P 合金体系中强化相的析出,使析出相在基体中更加细小和弥散,从而获得良好的强度和导电性结合,并在一定程度上提高了合金的抗软化温度^[19]。GUO F A 等^[19]发现添加 0.8% 的 RE 比不添加 RE 的 Cu-Fe-P-Cr 合金抗软化温度高 70 ℃。

1.2 Cu-Ni-Si 系合金

Cu-Fe-P 合金是目前用量最大的引线框架材料,但其强度相对较低、抗软化温度不高且具有磁性,已不能完全满足引线框架用材料的需求。Cu-Ni-Si 合金具有理相的强度、较高的抗软化温度以及无磁性等特点,因此具有广阔的市场应用前景。表 1 为 Cu-Ni-Si 合金性能总结。Cu-Ni-Si 合金是典型的析出强化型铜合金。在 Cu-Ni-Si 合金时效析出的过程中,其析出相主要有 δ -Ni₂Si 和 β -Ni₃Si。在 Cu-Ni-Si 合金中均观察到了 δ -Ni₂Si 或 β -Ni₃Si 相的析出^[20],可明显提高合金的力学性能^[21,22]。其中, δ -Ni₂Si 与 Cu 基体存在一定的位相关系,即(100)_{Cu} || (001) _{δ} , [011]_{Cu} || [010] _{δ} 。此外,与其他析出相相比, δ -Ni₂Si 析出相的生成焓最低,具有最好的热力学稳定性。LEI Q 等^[23]发现 Cu-Ni-Si 合金中除 δ -Ni₂Si 外,还存在立方析出相 β -Ni₃Si,其与 Cu 基体的位相关系为(11 $\bar{1}$)_{Cu} || (11 $\bar{1}$) _{β} || (0 $\bar{2}$ 1) _{δ} 和(112)_{Cu} || (112) _{β} || (012) _{δ} 。Cu-Ni-Si 合金析出相有连续析出和不连续析出,通过晶界迁移形成的不连续析出相往往会对 Cu-Ni-Si 合金性能产生不良影响,而连续析出相具有明显的强化作用。SRIVASTAVA V C 等^[24]利用喷射成形技术制备的 Cu-Ni-Si 合金经 450 ℃过时效后会形成不连续的析出相,导致合金性能下降。因此,可通过成分设计和工艺优化来控制 Cu-Ni-Si 合金中的不连续析出,从而保证合金的优良性能。总的来说,Cu-Ni-Si 合金在时效析出的过程中,主要存在 δ -Ni₂Si 和

β -Ni₃Si 析出相,且 δ -Ni₂Si 析出相的热稳定性和强化效果比 β -Ni₃Si 相好,所以,在成分设计时常将 Ni 和 Si 的摩尔比设为 2 : 1,一方面能够达到好的强化效果,另一方面也能够优化电导率。然而,在时效析出过程中,Ni 和 Si 原子不可能完全从 Cu 基体中析出,固溶的原子会散射自由电子,降低 Cu-Ni-Si 合金的电导率。

1.3 Cu-Cr-Zr 系合金

随着高强高导铜合金的发展,Cu-Ni-Si 合金的低电导率已不能满足大规模集成电路引线框架和电气化机车接触线导电性能的要求。Cu-Cr-Zr 系合金是在 Cu-Cr 二元合金体系基础上发展起来的。Cu-Cr 二元合金最大的不足是经过固溶时效处理后,Cr 析出相的热稳定性差容易产生过时效,且存在明显的中温脆性问题。Zr 的添加能明显细化和球化 Cr 析出相,而且可形成富 Zr 相钉扎晶界,提高晶界强度,改善疲劳性能和中温脆性^[28]。

孪晶界作为一种特殊的晶界,对自由电子的散射较小,相比于普通的晶界,孪晶界的电阻率更低。同时,孪晶界能够有效地阻碍位错的移动,显著提高强度^[4]。因此,在铜合金中引入纳米变形孪晶成为高强高导铜合金研究的前沿和热点^[29]。影响变形孪晶的主要因素包括合金层错能、变形温度和应变速率等,降低层错能和变形温度,提高应变速率,有利于促进形成变形孪晶。ZHAO W 等^[11]利用低温动态塑性变形,即在低温下对材料进行高应变速率的冲击变形,制备出高密度的纳米变形孪晶,获得强度和电导率优异的块体材料。SUN L X 等^[30]对 Cu-1Cr-0.1Zr 进行了低温动态塑性变形和退火处理,制备出纳米变形孪晶体积分数高达 20% 的铜合金,抗拉强度和电导率分别达到 700 MPa 和 45.53 MS/m。LI R G 等^[31]选用既能有效降低铜合金层错能,又能时效析出的 Zr 元素,首先通过固溶处理形成层错能较低的 Cu-Zr 合金,然后通过低温轧制(液氮温度)促进形成大量变形孪晶,最后通过时效处理析出溶质原子,获得纳米孪晶与纳米析出相共存组织,实现强度和导电性的协同提升。在纳米孪晶和纳米析出相共同强化思想指导下,LI R G 等^[32,33]进一步设计出层错能更低的析出强化型 Cu-Cr-Zr-Hf 合金,该合金在室温轧制条件下就可以形成一定的纳米孪晶,减弱了对极低变形温度的依赖。

机械处理法是制备高强高导铜合金的常用方法,主要包括熔炼-均匀化-热轧-固溶处理-冷变形-时效处理等一系列工艺,逐渐发展出了等径角挤压、高压扭转、累积叠轧、低温轧制、低温搅拌摩擦、动态塑性变形、旋转模锻等工艺,制备出一系列性能优异的铜合金材

表 1 Cu-Ni-Si 合金性能总结

Tab.1 Performance summary of Cu-Ni-Si alloy				
编号	成分	抗拉强度/MPa	硬度 (HV)	电导率/(MS·m ⁻¹)
1	Cu-5.98Ni-1.29Si-0.24Ti ^[25]	—	315.9	33.118
2	Cu-4.5Ni-1.2Co-1.0Si-0.15Mg ^[22]	1 086	329	17.458
3	Cu-2Ni-0.5Si-0.3Cr ^[26]	697	—	31.726
4	Cu-2Ni-0.5Si-0.15Cr-0.15Zr ^[27]	706	—	27.956
5	Cu-6.0Ni-1.0Si-0.5Al-0.15Mg-0.1Cr ^[23]	1 090	—	15.370
6	Cu-6.0Ni-1.0Si-0.5Al-0.15Mg ^[21]	1 095.7	—	15.428

料^[34,35]。有研究者开发了两步轧制-时效工艺,即初始轧制-中间时效-最终轧制-最终时效工艺,该工艺在铜合金最终轧制前引入纳米析出相,这些析出相在后续的轧制中能有效提升孪晶形核驱动力,进而促进形成大量纳米变形孪晶,通过两步室温轧制-时效制备出抗拉强度为 628 MPa、电导率为 46.603 MS/m 的 Cu-Cr-Zr-Hf 合金^[36];进一步降低变形温度,通过两步低温轧制-时效可以制备出抗拉强度为 684 MPa、电导率为 46.313 MS/m 的铜合金。表 2 为不同工艺条件下 Cu-Cr-Zr 系合金的抗拉强度、硬度和电导率。总的来说,如何通过优化工艺来引入纳米级析出相和纳米孪晶从而达到调控材料的强度和导电性是目目前工艺优化的策略之一。

表 2 不同工艺条件下 Cu-Cr-Zr 系合金的强度、硬度和电导率

Tab.2 Strength, hardness and electrical conductivity of Cu-Cr-Zr series alloys under different process conditions					
编号	成分	工艺	抗拉强度/MPa	硬度 (HV)	电导率/(MS·m ⁻¹)
1	Cu-0.98Cr-0.057Zr ^[34]	冷轧时效	669	—	43.21
2	Cu-0.4Cr-0.3Zr ^[35]	时效冷轧	568	—	43.674
3	Cu-1Cr-0.1Zr ^[36]	两步轧制时效	648	—	46.284
4	Cu-0.55Cr-0.2Zr ^[6]	低温搅拌摩擦	840	—	51.62
5	Cu-0.79Cr-0.19Zr ^[37]	粉末冶金	625	—	45.82
6	Cu-0.3Cr-0.1Zr-0.05Mg ^[38]	旋转锻	612	—	49.126
7	Cu-0.4Cr-0.2Zr-0.15Mg ^[28]	冷轧时效	549	—	47.757 2
8	Cu-0.36Cr-0.03Zr ^[39]	真空熔炼时效	—	156	47.919 6
9	Cu-0.4Cr-0.15Zr-0.05Ce ^[40]	冷轧时效	—	170	38.28
10	Cu-0.81Cr-0.12Zr-0.05La-0.05Y ^[41]	冷轧时效	—	186	46.98

2 耐热铜合金

根据强化机理不同,耐高温铜合金可分为析出强化型和颗粒弥散强化型。作为典型的析出强化型 Cu-Cr 合金是研究比较早的铜合金体系,在高温条件下,Cr 析出相的快速粗化导致 Cu-Cr 合金具有较差的高温抗软化能力。优化 Cu-Cr 合金抗软化性能最常用的方法是通过微合金化优化成分,如 Cu-Cr-Ti、Cu-Cr-Mg、Cu-Cr-Ag、Cu-Cr-Zr 和 Cu-Cr-Nb 合金等。随着合金元素添加到 Cu-Cr 合金中,合金元素与 Cr 产生相互作用,降低了元素的扩散速率,抑制了合金的再结晶和析出相粗化,从而提高了合金的抗软化性能^[42]。有研究指出,Cu-Cr-Mg 相比于 Cu-Cr 合金在 420 ℃时效过后硬度(HV)提高 16.5%;此外,Nb 元素的添加可以优化 Cu-Cr 合金的抗软化性能,使其抗软化温度达 520 ℃^[43,44]。ZHANG S R 等^[45]通过原位合成方法制备了 Cu-Zr-ZrB₂ 合金,经过低温轧制和时效处理后形成了纳米级析

出相 Cu₅Zr 和微米级 ZrB₂,获得了良好的强度和导电性。另外,Cu-Zr-ZrB₂ 的高温力学性能要比 Cu-Zr 合金高,在 573 K 条件下添加 ZrB₂ 的试样要比 Cu-Zr 试样的抗拉强度提高 7%,而室温条件下仅为 3%,说明微米级 ZrB₂ 颗粒能够钉扎位错而提高了合金的抗软化能力^[45]。Cu-Al₂O₃ 作为典型的弥散强化铜合金,具有优异的强度、导电性和耐高温性能,其主要制备方法为内氧化法和机械合金化法。

合金在高温条件下的软化过程主要与两方面有关:一是高温下合金基体中析出相的粗化,二是高温下合金基体的回复和再结晶。其中,回复再结晶对合金的抗软化能力要比析出相粗化影响要大^[7]。合金的抗软化性能和合金基体的再结晶过程密切相关。冷变形过程中形成的高密度位错会为析出相提供形核质点使析出相更加细小和弥散,同时也增加了基体回复和再结晶的驱动力。但是,在时效析出过程中,一方面析出相会阻碍位错的运动而延缓回复再结晶;另一方面也会对晶界产生钉扎作用,在一定程度上阻碍再结晶晶粒的长大,延缓再结晶过程。随着时效温度升高,析出相容易粗化,减弱了再结晶的阻碍作用和位错的钉扎作用。因此,如何抑制时效过程中的回复再结晶是提高铜合金抗软化性能的关键。

3 耐磨铜合金

提高铜合金耐磨性常用的方式是在基体中引入纳米级弥散颗粒或微/纳米级双尺度颗粒,在不损害导电性的同时提高其强度和耐磨性。ZOU C L 等^[46]通过在铜合金中原位反应形成具有高熔点、高硬度、良好的耐磨性和热稳定性的 TiB₂ 颗粒,制备了 TiB₂ 颗粒增强铜基复合材料。由于 TiB₂ 颗粒的存在及其与铜基体的良好界面结合使合金的耐磨性显著提高,在较低的载荷和滑动速度下,Cu-TiB₂ 与纯 Cu 的耐磨性相差不大,但在高的载荷和转速下 Cu-TiB₂ 的体积磨损量不超过 1 mm³,较纯 Cu 的磨损量降低了 66.7%~87.5%。而且,随着 TiB₂ 含量增加,合金的耐磨性明显提高,强度和硬度也有所改善,但导电性和伸长率有所下降。在此基础上,通过在合金中添加 La 元素后促进了 TiB₂ 颗粒的均匀分布并改善了合金的导电性。此外,为平衡强度、电导率和耐磨性,还研究了 Cu-Zr-B 双级颗粒强化铜基复合材料,利用原位反应在合金中形成微米级的 ZrB₂ 和通过将过固溶的 Zr 以纳米级 Cu₅Zr 析出,获得了微/纳米双级颗粒协同强化的效果,在提高强度的同时,在更高的载荷(45 N)和转速下(150 r/min),Cu-Zr-ZrB₂ 具有更小的体积磨损量(2 mm³),比 Cu-Zr 要低

80.0%~87.5%^[47]。ZHENG R G 等^[48]通过内氧化法制备了Cu-La₂O₃纳米复合材料,纳米级La₂O₃颗粒分布均匀,有效地提高了合金的强度和硬度,且当La₂O₃含量达到1.3%时,合金的综合性能最优,比纯Cu的磨损率降低了39%。

耐磨铜合金具有优异的强度、硬度和耐磨性,主要是通过基体中弥散分布的强化相实现的,弥散强化相一般为高温稳定性好和硬度高的颗粒。这些弥散的强化相颗粒常均匀分布在铜基体中,在高温条件也不会明显粗化,利于强度、硬度和耐磨性的提高,同时又不会明显降低电导率。除了常规摩擦磨损,研究者也开展了载流条件下的摩擦磨损研究^[49]。在载流条件下,合金的粘着磨损、磨粒磨损和电弧烧蚀是其磨损的主要机制。

4 结 语

(1)从服役性能需求出发,主要介绍了高强高导铜合金、高强高导高耐热铜合金和高强高导高耐磨铜合金的研究现状及发展历程。高强高导析出强化型铜合金从Cu-Fe-P、Cu-Ni-Si、Cu-Cr-Zr合金体系展开阐述,介绍了其主要组织结构以及组织与性能之间的关联,总结了高强高导铜合金常见制备工艺,发现调控纳米孪晶数量是制备高强铜合金的关键,开发一种适用于室温变形且可有效提高纳米孪晶体积分数工艺成为研究热点。

(2)高导高耐热铜合金的抗软化能力与回复再结晶过程密切相关,在时效初期和时效温度较低时,析出相的形成对再结晶过程起阻碍作用,但随着温度升高,其阻碍作用逐渐减小直至再结晶过程发生,如何抑制时效过程中的回复再结晶是提高铜合金抗软化性能的关键。铜基复合材料是耐磨铜合金的主要类型,主要是通过基体中引入纳米级弥散颗粒或微/纳米级双尺度颗粒来获得优异的综合性能。

参 考 文 献

- [1] 张文芹. 引线框架用铜带产品现状及研发进展[J]. 有色金属加工, 2015, 44(5): 5-8.
- [2] LI Y P, XIAO Z, LI Z, et al. Microstructure and properties of a novel Cu-Mg-Ca alloy with high strength and high electrical conductivity[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 723: 1 162-1 170.
- [3] 徐志伟. “按钮战争”即将来临(上)——国外电磁炮的最新进展[J]. 坦克装甲车辆, 2018(9): 32-36.
- [4] 吴德振, 杨为良, 徐恒雷, 等. 高强高导铜合金的应用与制备方法[J]. 热加工工艺, 2019, 48(4): 19-25.
- [5] 李周, 肖柱, 姜雁斌, 等. 高强导电铜合金的成分设计、相变与制备[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2 009-2 049.
- [6] WANG Y P, FU R D, LI Y J, et al. A high strength and high electrical conductivity Cu-Cr-Zr alloy fabricated by cryogenic friction stir processing and subsequent annealing treatment[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A755: 166-169.
- [7] 汪明朴, 贾延琳, 李周. 先进高强导电铜合金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015.
- [8] 钟海燕, 袁孚胜. 高强高导铜铬锆合金的市场现状分析[J]. 有色冶金设计与研究, 2019, 40(1): 28-30.
- [9] KAPOOR G, KVACKAJ T, HECZEL A, et al. The influence of severe plastic deformation and subsequent annealing on the microstructure and hardness of a Cu-Cr-Zr alloy[J]. Materials, 2020, 13(10): 14-19.
- [10] LIU Y, LI Z, JIANG Y, et al. The microstructure evolution and properties of a Cu-Cr-Ag alloy during thermal-mechanical treatment[J]. Journal of Materials Research, 2017, 32(7): 1 324-1 332.
- [11] ZHAO W, TAO N, GUO J, et al. High density nano-scale twins in Cu induced by dynamic plastic deformation[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(6): 745-749.
- [12] LU L, SHEN Y, CHEN X, et al. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper[J]. Science, 2004, 304(5 669): 422-426.
- [13] 闫涛, 刘贵民, 朱硕, 等. 电磁轨道材料表面损伤及强化技术研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(1): 135-140, 148.
- [14] ZHUKOV V P, SUSLOV D I. Measurements and modelling of wall heat fluxes in rocket combustion chamber with porous injector head[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 48: 67-74.
- [15] 董家明. 引线框架高速镜银添加剂及工艺研究[D]. 武汉: 武汉材料保护研究所, 2016.
- [16] DEROSA S, NÅVIK P, COLLINA A, et al. A heuristic wear model for the contact strip and contact wire in pantograph-Catenary interaction for railway operations under 15 kV and 16.67 Hz AC systems[J]. Wear, 2020, 456-457: 203 401.
- [17] JIANG T, FRØSETH G T, RÖNNQUIST A, et al. A robust line-tracking photogrammetry method for uplift measurements of railway catenary systems in noisy backgrounds[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144: 106 888.
- [18] XIAO X P, XU H, CHEN J S, et al. Aging properties and precipitates analysis of Cu-2.3Fe-0.03P alloy by thermomechanical treatments[J]. Materials Research Express, 2017, 4(11): 1-9.
- [19] GUO F A, XIANG C J, YANG C X, et al. Study of rare earth elements on the physical and mechanical properties of a Cu-Fe-P-Cr alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2008, B147(1): 1-6.
- [20] ZHOU Y, CHEN D B, DUAN L C, et al. Enhanced hardness and moderate thermal conductivity of Cu-2.4Ni-0.7Si alloy processed via selective laser melting followed by suitable heat treatment[J]. Journal of Laser Applications, 2020, 32(1): 012 006.
- [21] XIAO T, SHENG X F, LEI Q, et al. Effect of magnesium on microstructure refinements and properties enhancements in high-strength CuNiSi alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019, 33(3): 375-384.
- [22] HUANG J Z, XIAO Z, DAI J, et al. Microstructure and properties of a novel Cu-Ni-Co-Si-Mg Alloy with super-high strength and conductivity[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A744:

- 754-763.
- [23] LEI Q, LI Z, XIAO T, et al. A new ultrahigh strength Cu-Ni-Si alloy[J]. Intermetallics, 2013, 42: 77-84.
- [24] SRIVASTAVA V C, SCHNEIDER A, UHLENWINKEL V, et al. Age-hardening characteristics of Cu-2.4Ni-0.6Si alloy produced by the spray forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147(2): 174-180.
- [25] KIM H G, LEE T W, KIM S M, et al. Effects of Ti addition and heat treatments on mechanical and electrical properties of Cu-Ni-Si alloys[J]. Metals and Materials International, 2013, 19(1): 61-65.
- [26] WANG W, GUO E Y, CHEN Z N, et al. Correlation between microstructures and mechanical properties of cryorolled CuNiSi alloys with Cr and Zr alloying[J]. Materials Characterization, 2018, 144: 532-546.
- [27] WANG W, KANG H J, CHEN Z N, et al. Effects of Cr and Zr additions on microstructure and properties of Cu-Ni-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A673: 378-390.
- [28] HOU B, ZUO L F, TAO F Y, et al. Effect of aging process on organization and performance of Cu-Cr-Zr-Mg alloys[J]. Advanced Research on Materials, Applied Mechanics and Design Science, 2013, 327: 117-122.
- [29] 李仁庚. 高强高导 Cu(Cr)Zr 系合金微结构设计及调控[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2019.
- [30] SUN L X, TAO N R, LU K. A high strength and high electrical conductivity bulk CuCrZr alloy with nanotwins[J]. Scripta Materialia, 2015, 99: 73-76.
- [31] LI R G, ZHANG S J, KANG H J, et al. Microstructure and texture evolution in the cryorolled CuZr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 693: 592-600.
- [32] LI R G, ZHANG S, ZOU C, et al. The roles of Hf element in optimizing strength, ductility and electrical conductivity of copper alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A758: 130-138.
- [33] LI R G, KANG H J, CHEN Z N, et al. A promising structure for fabricating high strength and high electrical conductivity copper alloys[J]. Scientific Reports, 2016(6): 20 799.
- [34] FU H D, XU S, LI W, et al. Effect of rolling and aging processes on microstructure and properties of Cu-Cr-Zralloy[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A700: 107-115.
- [35] MENG A, NIE J, WEI K, et al. Optimization of strength, ductility and electrical conductivity of a Cu-Cr-Zr alloy by cold rolling and aging treatment[J]. Vacuum, 2019, 167: 329-335.
- [36] LI R G, GUO E Y, CHEN Z N, et al. Optimization of the balance between high strength and high electrical conductivity in Cu-CrZr alloys through two-step cryorolling and aging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 1 044-1 051.
- [37] 赵凡, 刘祖铭, 吕学谦, 等. 粉末冶金 Cu-Cr-Zr 合金的形变热处理组织及性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(4): 385-390.
- [38] HUANG A H, WANG Y F, WANG M S, et al. Optimizing the strength, ductility and electrical conductivity of a Cu-Cr-Zr alloy by rotary swaging and aging treatment[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A746: 211-216.
- [39] 丁宗业, 贾淑果, 宁向梅, 等. 高强高导 Cu-Cr-Zr 合金时效性能[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(12): 2 420-2 425.
- [40] ZHANG Y, VOLINSKY A A, TRAN H T, et al. Aging behavior and precipitates analysis of the Cu-Cr-Zr-Ce alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A650: 248-253.
- [41] PAN Z Y, CHEN J B, LI J F. Microstructure and properties of rare earth-containing Cu-Cr-Zr alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(4): 1 206-1 214.
- [42] SUN Y, PENG L, HUANG G, et al. Effects of Mg addition on the microstructure and softening resistance of Cu-Cr alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A776: 139 009.
- [43] ZHAO Z Q, XIAO Z, LI Z, et al. Effect of magnesium on microstructure and properties of Cu-Cr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 752: 191-197.
- [44] GUO X L, XIAO Z, QIU W T, et al. Microstructure and properties of Cu-Cr-Nb alloy with high strength, high electrical conductivity and good softening resistance performance at elevated temperature[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A749: 281-290.
- [45] ZHANG S R, KANG H J, LI R G, et al. Microstructure evolution, electrical conductivity and mechanical properties of dual-scale Cu₅Zr/ZrB₂ particulate reinforced copper matrix composites[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A762: 138 108.
- [46] ZOU C L, CHEN Z N, KANG H J, et al. Study of enhanced dry sliding wear behavior and mechanical properties of Cu-TiB₂ composites fabricated by in situ casting process[J]. Wear, 2017, 392: 118-125.
- [47] ZOU C L, CHEN Z N, GUO E Y, et al. A nano-micro dual-scale particulate-reinforced copper matrix composite with high strength, high electrical conductivity and superior wear resistance[J]. Rsc Advances, 2018, 8(54): 30 777-30 782.
- [48] ZHENG R G, LI N N, ZHAN Z J. Friction and wear behavior of Cu-La₂O₃ composite sliding against 52100 bearing steel in vacuum[J]. Vacuum, 2019, 161: 55-62.
- [49] FENG J, SONG K, LIANG S, et al. Electrical wear of TiB₂ particle-reinforced Cu and Cu-Cr composites prepared by vacuum arc melting[J]. Vacuum, 2020, 175: 109 295.

(编辑:刘晨辉)

2020 年中国镁出口 39.38 万 t

海关总署统计数据显示,2020 年中国 6 种税号镁产品出口量共计 39.38 万 t,同比减少 12.78%。

其中,2020 年中国镁锭出口量 20.35 万 t,同比减少 15.35%;镁合金出口量 10.72 万 t,同比减少 4.96%;镁制品出口量为 0.50 万 t,同比减少 3.85%。

分析指出,2020 年受新冠肺炎疫情冲击,中国镁产品出口量下降明显,其中,镁锭出口量降幅较大,镁合金受影响程度相对较小。随着国内利好消息提振,及海外疫情形势有所缓解,我国镁出口明显好转,尤其 12 月份镁价高位回调,出口集中走货增多。

(摘自压铸周刊)