



Cu-Ni-Si系引线框架铜合金的发展与展望

李长鸣¹, 邹存磊^{1*}, 金汉¹, 张爽¹, 董闯^{1,2}

(1. 大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028; 2. 大连理工大学/三束材料改性教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 高性能引线框架铜合金在电子封装行业中扮演着核心角色,对电子设备的性能和稳定性具有决定性的影响。5G和人工智能技术的发展使得对这类材料的需求激增,对其性能的要求也越来越高。首先,对引线框架铜合金的发展历程从Fe-Ni-Co系、Cu-Fe系到Cu-Ni-Si系进行了概述,同时强调了材料研究的重要性。其次,系统介绍了铜合金的制备技术、性能评价,深入分析了成分设计、微量元素添加、热处理和变形工艺对Cu-Ni-Si系合金性能的影响,强调了微量元素(如Al、Mg、Co、Cr、Ag、P和Ti)的添加能显著提升合金的力学性能和电导率,而精确的热处理和变形工艺对优化合金的微观结构和宏观性能至关重要。最后,在分析现有研究的基础上,总结了高性能引线框架铜合金所面临的挑战,如制备工艺的复杂性、性能调控的难度和市场竞争的激烈程度,预测了未来发展趋势,包括技术创新、环保可持续性、智能化功能化和国际合作的必要性。研究高性能引线框架铜合金具有重要的学术和市场价值,对电子信息技术的进步至关重要,未来的研究应探索新的合金设计、制备和性能调控技术,以满足日益增长的性能需求,而环保、智能化、国际合作将是推动该领域发展的关键。对引线框架铜合金的研究进行总结,为相关后续研究和实践提供了参考,对促进其创新和发展具有借鉴意义。

关键词: 引线框架铜合金; Cu-Ni-Si; 制备技术; 微量元素; 热处理和变形工艺; 力学性能; 电导率; 微观结构
中图分类号: TG14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9981(2025)02-0239-10

引文格式: 李长鸣, 邹存磊, 金汉, 等. Cu-Ni-Si系引线框架铜合金的发展与展望[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(2): 239-248.

LI Changming, ZOU Cunlei, JIN Han, et al. Development and Prospects of Cu-Ni-Si Lead Frame Copper Alloys[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(2): 239-248.

0 引言

引线框架铜合金作为电子封装领域的关键材料,对于提升电子产品的综合性能和可靠性起着至关重要的作用^[1-6]。自从1958年美国德州仪器公司工程师杰克基尔比(Jack Kilby)成功研制出世界上第一块集成电路以来,随着科技的迅猛进步,集成电路(IC)材料正朝着微型化、更高性能化的方向发展^[7-9]。在此背景下,引线框架铜合金的性能直接影响到集成电路的电气连接质量和机械稳定性,进而决定了电子产品的整体性能。因此,对高性能引线框架铜合金的研究不仅具有重要的学术价值,更具有广阔的市场前景和实际应用意义。

随着电子信息技术的不断进步,对引线框架铜合金的性能要求也越来越高。特别是在5G通信和

人工智能等新兴领域的推动下,对高性能引线框架铜合金的需求呈现出爆炸式的增长^[10]。这些应用场景对材料的导电性、机械强度、耐蚀性等性能提出了更为苛刻的要求,推动了高性能引线框架铜合金的研究与发展。

1 高性能引线框架铜合金的发展历程

1.1 国外引线框架材料的发展进程

自1958年美国首次开发集成电路以来,引线框架材料技术迅速发展,涌现出众多新型材料。在早期,引线框架常用的是Fe-Ni-Co系列可锻合金。自1978年起,受钴价格上涨的影响,可锻合金的成本增加,且这种合金中含有的Fe、Co以及微量Ni元素的回收技术复杂,经济型的Fe42Ni合金逐渐替代

收稿日期: 2024-09-06

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(52171134); 大连市科技创新基金应用基础研究项目(2022JJ12GX039); 大连市优秀青年科技人才项目(2022RY14)

作者简介: 李长鸣, 博士研究生, 研究方向为高性能铜合金。E-mail: Lichangming@88.com。

通信作者: 邹存磊, 博士, 副教授, 研究方向为高性能铜合金。E-mail: clzou@djtu.edu.cn。

Fe-Ni-Co合金。20世纪80年代后,随着铜合金引线框架的广泛应用,Fe42Ni合金的市场份额从40%逐渐降至约20%。由于Fe42Ni合金的热膨胀系数与陶瓷相匹配,其主要被用作陶瓷封装集成电路的框架材料。自90年代起,随着集成电路的高集成度和高线程化,以及引线框架化的需求,推动了相关合金的开发与研究,要求在具有优异导电性能的同时还需要保证导热性能。此外,封装技术的进步也推动了引线框架材的发展,随着材料封装技术渐成熟,铜合金引线框架材料的使用需求持续增长。

铜合金引线框架的发展经历了3个主要阶段。20世纪70年代,处于早期发展阶段,主要为低强高导型合金,其电导率超过80%IACS,抗拉度在300—500 MPa之间,代表性合金包括Cu-Fe系列的C19210和Cu-P系列的C12000^[11]。20世纪80年代,中强中导合金占据市场主导地位,其电导率大约为60%IACS(国际退火铜标准),而抗拉强度则在450—600 MPa之间。这一时期的典型产品是美国奥林公司推出的C19400,该合金隶属于Cu-Fe-P系列^[11],其特点是从铜基体晶界析出第二相Fe₂P和单

质Fe,属于典型的析出强化合金。20世纪80年代后期,主要采用高强中导合金,此时集成电路向大规模和超大规模发展,要求引线框架材料电导率范围区间为40%IACS—50%IACS,抗拉强度超600 MPa,主要代表有Cu-Ni-Si系列的C7035和PMC102^[12-13]。C70350合金经过时效处理后,(Ni,Co)₂Si颗粒从基体中析出,起到弥散强化作用;而PMC102合金则通过Ni₂Si颗粒在晶界的分布,以及微量元素P在晶格中的弥散。前者通过钉扎位错增强材料的强度,后者则通过促进排气和晶粒细化提升合金的强化效果。

高性能引线框架板带材铜合金的主要产地为英美德法和日本,其中欧洲和日本的发展最为迅猛。作为主要生产国,仅其中12个主要高性能铜合金生产企业研制的引线框架铜合金就高达44种,主要生产企业、合金牌号及成分列于表1。由表1可知:44种合金中Cu-Ni-Si系合金最多,共17种;按照Cu元素含量(质量分数,下同)划分, $w(\text{Cu}) \geq 99\%$ 的高铜合金有12种,其余的32种合金Cu含量皆在95%以上。

表1 国外引线框架铜合金板带材的主要生产企业、合金牌号及成分

Table 1 Main production enterprises, alloy grades, and compositions of copper alloy plates and strips for foreign lead frames

Manufacturing enterprise	Grades	Composition/%	Reference
三井金属	ML21	Cu-0.6Fe-0.3Ti-0.05Mg	https://www.mitsui-kinzoku.com/
	ML23	Cu-1.1Sn-0.2Fe-0.1Ti-0.05Mg-0.2Zn	
同和金属	C7025	Cu-3Ni-0.65Si-0.15Mg	https://www.dowametaltech.co.jp/cn/
	C7035	Cu-1.5Ni-1.1Co-0.6Si	
	C1972	Cu-0.22Fe-0.13Mg-0.1P	
	NB-105	Cu-1Ni-0.5Sn-0.05P	
	NB-109	Cu-1Ni-0.9Sn-0.05P	
	NB-115	Cu-0.9Ni-1.55Sn-0.07P	
	DK-3	Cu-0.2Fe-0.15Ni-0.07Sn-0.06P	
	YCuT-FX	Cu-3.2Ti	
	JASO-JC100	Cu-0.1(Fe + Ni + Sn + Zn + P)	
JX 金属	NKT322	Cu-3.2Ti-0.2Fe	https://www.jx-nmm.com/chinese/
	NKC286	Cu-2.8Ni-0.6Si-0.5Sn-0.4Zn	
	NKC1816	Cu-(1~2)Ni-(1~2)Co-(0.5~1)Si-(0.09~0.2)Cr	
	NKC388	Cu-3.8Ni-0.8Si-0.1Mg-0.13Mn	
	NKC164	Cu-1.6Ni-0.4Si-0.5Sn-0.4Zn	
	NKC164E	Cu-1.6Ni-0.35Si	
	NKC4419	Cu-1.9Co-0.44Si	
	NKC4820	Cu-1.5Ni-0.5Co-0.48Si	
日本丰山	PMC102	Cu-1Ni-0.2Si-0.03P	[12]

续表 1

Manufacturing enterprise	Grades	Composition/%	Reference
三菱伸铜	MAX251	Cu-2Ni-0.5Si-0.5Sn-1Zn	https://www.mitsubishicopper.com/en/
日立	ZCU58	Cu-2Ni-1Ti-0.15Mg	[12]
维兰德	K58	Cu-3.8Ni-0.75Si-0.15Mg	https://www.wieland.com/en/
	K65	Cu-2.4Fe-0.12Zn-0.03P	
	K73	Cu-1.5Ni-0.3Si-0.4Zn	
	K75	Cu-0.3Cr-0.1Ti-0.02Si	
	K76	Cu-1.3Ni-0.25Si-0.03P	
	K80	Cu-0.1Fe-0.03P	
	K88	Cu-0.5Cr-0.2Ag-0.08Fe-0.06Ti-0.03Si	
泛太平洋铜业	ML-21	Cu-0.6Fe-0.3Ti-0.05Mg	https://www.ppcu.co.jp/eng/
	ML-23	Cu-1.1Sn-0.2Fe-0.1Ti-0.05Mg-0.2Zn	
古河电工	CZC61	Cu-0.6Cr-0.1Zr	https://www.furukawa.co.jp/cn/
欧鲁比斯	C64760	Cu-1.8Ni-1.1Zn-0.4Si-0.1Sn	https://www.aurubis.com/en/
	C70260	Cu-2Ni-0.4Si	
神户制钢	KFC	Cu-0.1Fe-0.03P	https://www.kobelco.co.jp/chinese/
	KLF-2	Cu-0.1Fe-0.03P-0.1Sn	
	KLF-5	Cu-0.1Fe-0.03P-2Sn	
	CAC5	Cu-0.8Ni-0.07P-1.2Sn	
	CAC16	Cu-0.1Fe-0.03P-0.4Zn-0.2Sn-0.2Mg	
	CAC19	Cu-1.9Fe-0.05Si-0.15Zn-0.1Sn-0.1Mg	
	CAC75	Cu-2.5Ni-0.55Si-1Zn-0.2Sn	
安博科金	AMPCOLOY95	Cu-2(Ni+Co)-0.5Be	https://www.ampcometal.com/
	AMPCOLOY940	Cu-2.5Ni-0.7Si-0.4Cr	
	AMPCOLOY972	Cu-1Cr-0.1Zr	

1.2 国内引线框架材料的发展进程

从20世纪80年代起,国内便涉足高强高导铜合金引线框架材料的研制与生产活动,但遗憾的是,由于当时自主创新能力尚显薄弱,因此主要依靠技术引进和产品仿制,未能对该材料进行深入系统的探究^[13]。这导致了在技术和质量方面与国际先进水平存在一定差距。当前,尽管我国在高强度、高导电性铜合金材料的研发与制造领域已取得显著成就,但与超大规模集成电路的高标准相比仍有一段距离,这使得国内市场对这些材料的需求尚有空缺。因此,国内市场对这类高性能铜合金材料的供应在很大程度上仍依赖于进口。

鉴于高强高导铜合金在集成电路引线框架材料领域的巨大市场需求,自1987年起我国便开始了引线框架铜合金板带材的工业化生产^[13]。然而,时至今日,仍然无法满足市场对高强高导引线框架铜合金带材的需求量。2013年国内对该类材料的需求量达到了60 000 t,但国内产量却仅为25 000 t,剩余

部分完全依赖进口。截至2023年,需求量更是飙升至900 000 t,其中30%的高端精密铜带箔材产品仍需进口。目前,国内在引线框架合金领域已取得显著进展,其中Cu-Ni-Sn系和Cu-Cr系合金材料已经具备了完全自主的生产技术,并能够提供稳定的供货能力,具体合金牌号、性能列于表2。目前,我国能够大规模生产集成电路用引线框架铜合金材料的企业包括宁波兴业盛泰、中铝洛铜、山西太原晋西春雷、上海有色金属总公司、鑫科材料以及安徽精诚铜业等,然而多数企业专注于生产适用于中低端应用的Cu-Ni-Sn系合金(如QSn6.5-0.1)。近年来,国内引线框架带材产业化水平得到大幅提升,以山西太原晋西春雷的2-450×16 mm双流铜带水平连铸机组为例,其QSn6.5-0.1合金引线框架带材的单位产能为1.27 t·h⁻¹,年产能为7 620 t。尽管Cu-Ni-Sn系(QSn6.5-0.1)合金带材产能实现了产业化生产,但这类产品主要用于中低端连接器以及某些低端集成电路领域。

表2 国产引线框架铜合金板带材
Table2 Domestic lead frame copper alloy plate and strip

Types	Grades	Hardness(HV)	Tensile strength/ MPa	Conductivity/ % IACS	Reference
High conductivity	KFC-1/2H	100—130	355—430	85	https://www.kobelco.co.jp/chinese/ https://cn.astm.org/zh/standards/
	C1220				
	C19210				
Medium strength and medium conductivity	C194-H	≈175	410—480	48	https://www.mitsubishicopper.com/en/
	CAC92				
High strength and medium conductivity	C7025	180—220	600—725	40—55	https://cn.astm.org/zh/standards/ GB/T 5231-2012
	KLF-125				
	QSn6.5-0.1				
	C194-ESH				
	EFTEC64T				

在满足大规模和超大规模集成电路需求的时效析出强化合金领域,比如国际上广泛关注的Cu-Ni-Si系列高性能铜合金,中国目前还没有生产商能够实现大规模的工业化生产。不过,最近10年内,如北京科技大学、大连交通大学、宁波兴业盛泰、宁波博威等高校和企业,已经开始对C70250合金的小型铸锭开展了一系列实验研究并初步实现产业化实践^[16-17]。尽管如此,这些合金在电导率、力学性能以及耐高温变形等方面的综合表现,与国际先进水平相比较仍然存在不小的距离。

通过对高性能引线框架铜合金的历史发展和评价体系进行深入分析,可以更加清晰地了解这类材料在电子封装领域的重要地位和作用,以及未来发展的方向和重点。同时,这也为后续的制备技术、性能评价和应用案例分析提供了理论支撑和指导。

2 高性能引线框架铜合金的制备技术

高性能引线框架铜合金的制备技术是实现合金优异性能的关键环节,制备技术的选择和优化直接影响到材料的微观结构和宏观性能。

2.1 传统制备技术回顾

传统的制备技术如铸造和热加工等,仍然是高性能引线框架铜合金制备的重要手段。其中,铸造技术包括砂型铸造、金属型铸造和压力铸造等^[14],是通过熔炼和浇注过程得到所需形状和尺寸的铜合金材料。热加工技术如轧制、锻造和挤压等,是通过塑性变形改变材料的微观结构,提高其力学性能和导电性能。然而,传统技术往往存在精度不高、能耗大、效率低等问题,难以满足高性能引线框架铜合金的制备需求。

2.2 先进制备技术的发展与应用

随着科技的进步,先进制备技术如粉末冶金技

术、快速凝固技术和纳米晶技术等,逐渐应用于高性能引线框架铜合金的制备中^[15-17]。粉末冶金技术通过将铜合金粉末压制成型和烧结,可以获得高密度、高纯度和优异力学性能的材料。快速凝固技术通过快速冷却熔融铜合金,形成细小的晶粒和均匀的组织,提高材料的导电性和力学性能。纳米晶技术通过控制晶粒尺寸在纳米级别,实现材料性能的极大提升,如高强度、高硬度和优异的耐磨性等。

2.3 制备工艺参数对材料性能的影响

在制备高性能引线框架铜合金的过程中,工艺参数对材料性能具有重要影响。例如,铸造温度、浇注速度和冷却速率等工艺参数会影响材料的微观结构和缺陷状态,进而影响材料的力学性能和导电性能。此外,热加工过程中的变形量、变形速率和变形温度等参数也会对材料的性能产生显著影响。因此,在制备过程中需要精确控制工艺参数,以获得具有优异性能的高性能引线框架铜合金。

综上所述,高性能引线框架铜合金的制备技术是实现铜合金优异性能的关键环节。通过传统制备技术和先进制备技术的结合与优化,可以获得具有优异性能的高性能引线框架铜合金,满足电子封装领域的需求。同时,对制备工艺参数的深入研究和精确控制也是提升材料性能的重要手段。

3 高性能引线框架铜合金的性能评价与测试方法

高性能引线框架铜合金的性能评价通常遵循一系列国际和国内标准和行业规定,如美国材料与试验协会(ASTM)、国际电工委员会(IEC)以及中国国家标准(GB)等。这些标准详细规定了引线框架铜合金的化学成分配比、力学性能、电学性能、耐蚀性能、耐高温软化性能等技术要求,为材料的研发、

生产和应用提供了统一的评价依据。此外,不同的应用领域和特定的使用环境可能还会有额外的性能要求和评价标准。例如,高端功能与智能材料重点专项中指出,为了应对超大规模集成电路长时运转发热的问题,要求引线框架铜合金材料的抗软化温度 $\geq 500^{\circ}\text{C}$ 。对于高性能引线框架铜合金而言,其性能评价是确保产品质量和满足应用需求的重要环节,性能评价涉及多个方面,包括电学性能、机械性能、耐蚀性能等,而针对这些性能的测试方法则是评价的基础。

3.1 电学性能的测试与评价

电学性能是评价引线框架铜合金最重要的指标之一,主要包括电阻率和导电性^[18]。电阻率是材料对电流流动的阻碍程度,而导电性则是指材料传导电流的能力。对于高性能引线框架铜合金而言,低电阻率和高导电性是基本要求。电学性能的测试通常采用四探针法或八探针法等测量电阻率,然后通过计算得出导电性,这些测试方法能够准确地评估材料的电学性能,为产品的设计和应用提供依据。

3.2 机械性能的测试与评价

机械性能是评价高性能引线框架铜合金的另一重要指标,主要包括抗拉强度、延伸率和硬度等。抗拉强度是指材料在拉伸过程中能够承受的最大应力,而延伸率则是指材料在断裂前能够发生的最大塑性变形。硬度是指材料表面抵抗局部压入的能力。对于高性能引线框架铜合金而言,高的抗拉强度和良好的延展性是基本要求,以保证在加工和使用过程中的稳定性和可靠性。机械性能的测试通常采用拉伸试验、硬度试验和冲击试验等方法,这些方法能够准确地评估材料的机械性能,为产品的加工和应用提供依据。

3.3 耐蚀性能的测试与评价

耐蚀性能是评价高性能引线框架铜合金的重要指标之一,特别是在潮湿和腐蚀性环境下。耐蚀性能的好坏直接影响到材料的使用寿命和可靠性。耐蚀性能的测试通常采用盐雾试验、铜加速醋酸试验(Cu-ACC)和电化学测试等方法^[19]。这些方法能够模拟实际使用环境中的腐蚀条件,评估材料的耐蚀性能。通过对耐蚀性能的测试和评价,可以选择适合特定应用环境的高性能引线框架铜合金。

综上所述,高性能引线框架铜合金的性能评价是确保产品质量和满足应用需求的重要环节。通过对电学性能、机械性能和耐蚀性能的测试和评价,可以全面了解材料的性能特点和适用范围,为产品的

设计、加工和应用提供依据。同时,随着科技的进步和测试方法的不断发展,对高性能引线框架铜合金的性能评价将更加准确和全面。

4 最新研究进展

随着材料科学和工程技术的不断进步,高性能引线框架铜合金的研究也在不断深入。近年来,国内外学者在引线框架铜合金的研发方面取得了一系列重要成果,为该领域的发展注入了新的活力。通过优化合金元素比例范围、引入新的合金元素、优化热处理和变形工艺参数的性能调控技术,研究者们成功地开发出了一系列具有优异电学、机械性能的新型铜合金材料,这些新材料为高性能引线框架铜合金的应用提供了更多的选择。

4.1 成分比例对合金性能的影响

合金的成分比例对其性能有着至关重要的影响。通过对合金元素的种类和含量进行优化,可以显著改善合金的微观组织和性能,进而改善合金的力学性能、导电性能以及其他相关的性能指标,从而满足更多样化的工程应用需求。

常君^[20]研究发现,当Cu-Ni-Co-Si合金中Ni/Co质量比为1—1.5时,合金再结晶组织的取向密度最小;当Ni/Co的质量比达到1.5时,该合金展现出最优异的综合性能,如抗拉强度为777 MPa、延伸率为3.6%,同时保持了较高的硬度水平,在这种Ni/Co质量比下合金沿着轧制方向表现出最大的塑性变形能力,其纵向弯曲加工性能达到最佳,实现了仅为2.1的最小弯曲强度比。李江等^[21]研究发现:在Ni/Co低质量比下,固溶不充分,第二相元素并没有溶解到Cu基体中,导致在随后的时效析出过程中缺乏析出驱动力^[22];随着Ni/Co质量比的增大,析出相尺寸逐渐增大且分布更加致密,合金的平均粒径变化范围在6—9 nm,此外析出相的体积分数和数密度也不断增大,表明析出过程更加充分;随着Ni/Co质量比值从0.05增加至4.12,试样的硬度先快速上升至峰值,然后急剧下降,当Ni/Co质量比为1.12—1.95时合金的硬度较高,当Ni/Co质量比为1.95时硬度达到最大值275 HV;而合金电导率在低Ni/Co质量比时较高,并随着Ni/Co质量比的增加而逐渐降低,在Ni/Co质量比值为0.05—0.5时电导率良好,当Ni/Co质量比值为0.05时电导率最高。

4.2 微量元素对合金性能的影响

在电子工业中的最新应用,由于器件尺寸较小,要求进一步加强合金的合理延展性的同时还要保持

高导电性。为了在不降低导电性的情况下获得额外的机械性能,尝试向铜合金中添加微量元素。

图1为添加不同微量元素Al、Mg、Co、Cr、Ag、P、Ti后Cu-Ni-Si合金的极限抗拉强度和电导率^[7,13,25,27-28,32-34,38-50]。从图1可以看出,元素Al和Mg的加入使Cu-Ni-Si合金具有较高的强度和较低的电导率。雷前等^[27]研究发现,元素Al的加入促进了第二相析出,有效细化了晶粒,提高了合金的抗应力松弛性能力。经50%冷变形和450℃×1h时效后,Cu-Ni-Si-Al合金的显微硬度为343HV、屈服强度为985MPa、电导率28.1%IACS,而在150℃下加载100h后的应力松弛为9.83%。Mg元素的加入会拖拽位错且钉住亚晶界,这有利于Cu-Ni-Si合金的抗应力松弛能力^[23]。而Co、Cr、Zr、P和V的加入会细化晶粒,这些微量元素赋予了Cu-Ni-Si合金卓越的综合性能,使其不仅具有出色的导电性,同时还拥有较高的强度。经多位学者^[24-26]研究发现,Cu-Ni-Si合金中Ni元素质量分数为2%—3%、Si为0.4%—1%时,合金表现出明显的沉淀硬化效应,这些过饱和固溶体的析出过程至少包括固溶体、Spinodal分解产生的调制结构、调制结构形成DO₂₂有序结构的(Cu,Ni)₃Si相及具有盘状结构的 δ -Ni₂Si相4个阶段。当向合金中添加少量元素Co后,Cu-Ni-Co-Si合金不经历一系列的亚稳过程,而是直接形成稳定的(Ni,Co)₂Si相,元素Co的加入抑制了旋节分解。张毅等^[32]研究了元素P的加入对Cu-Ni-

Si-P合金组织和力学性能的影响,发现在450℃下时效48h后,形成平均直径为5nm的半共格相(δ -Ni₂Si),同时合金还获得了电导率为49%IACS和屈服强度为804MPa的最佳综合性能,这是由于元素P的添加细化了晶粒尺寸并增加了沉淀物的成核速率。Ti元素的含量越高,合金的电导率和强度就越低。刘佳等^[33]研究了高Ti含量的时效强化Cu-3Ti-3Ni-0.5Si合金并发现:过高的Ti元素在Cu基体中的充分溶解生成CuTi第二相,增强了电子散射,但导电性较差;随着时效的进行,析出相颗粒由Cu₄Ti相转变为平衡非共格Cu₃Ti相,大大降低了Cu-Ni-Si合金的强度,但当Ti元素含量较低时其综合性能较好。有研究^[34-37]表明,少量Ti元素的加入可以细化晶粒,促进 δ -Ni₂Si相析出,这可以解释Cu-Ni-Si-Ti合金具有高强度和优异导电性的原因。

4.3 热处理及变形工艺参数对合金性能的影响

热处理和变形工艺参数对合金性能有着显著的影响,通过精确控制这些参数可以优化合金的微观结构,从而获得所需的力学性能和电学性能。

李周^[27]研究发现:在经过970℃×4h的固溶处理后,CuNiSi合金再经400℃×960min时效后硬度峰值为300HV、经450℃×180min时效后硬度峰值为309HV、经500℃×60min时效后硬度峰值为303HV,在温度400、450、500℃下时效20h后的电导率分别为34.8%IACS、35.1%IACS和33.9%IACS(见图2(a)和(b))。Wang等^[45]研究了时效时长对Cu-7.0Ni-1.75Si-0.5Cr合金硬度的影响,发现:热锻合金的硬度值最低为126HV,经过固溶处理后合金硬度值提升到221HV,时效进一步提高了显微硬度;随着时效时间的延长,在450℃时效6h时获得最大显微硬度341HV,相应的导热系数为140W·mK⁻¹(见图2(c))。Volinsky等^[52]研究了不同冷变形量对Cu-1.5Ni-1Co-0.6Si峰值硬度的影响(见图2(d)),结果表明合金的硬度随变形量的增加而增加,当冷轧变形量分别为0%、40%、80%时合金硬度(HV)分别为234、239和244。较高的峰值硬度取决于较高的冷变形量,在特定的时效周期内,轧制过程能够显著提升合金的电导率,在冷变形作用下合金内部产生空位和位错等晶体缺陷,这些缺陷增加了晶格的畸变能,促进了析出相的形成,从而增强了合金的电导率^[48,53-54]。

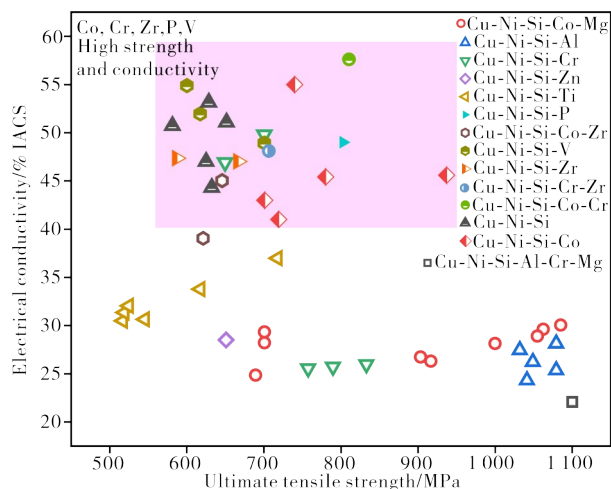
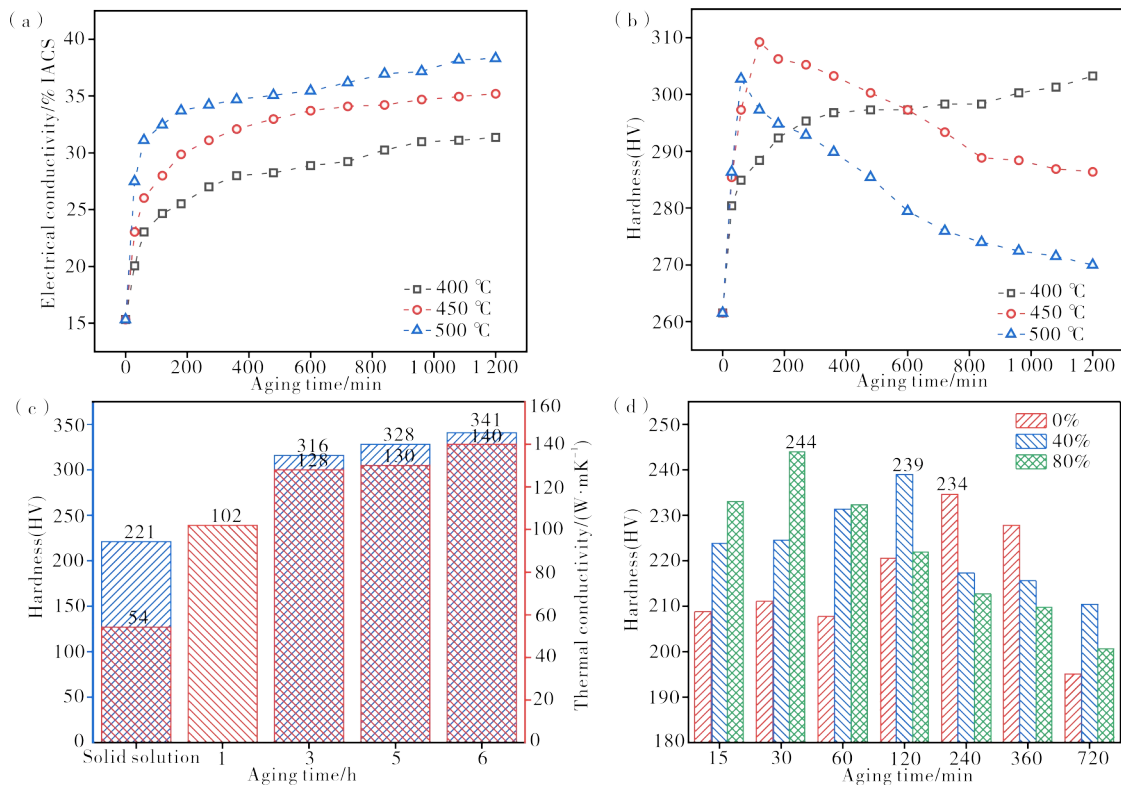


图1 不同微量元素对Cu-Ni-Si合金综合性能的影响^[7,21,23,27-44]

Figure 1 The influence of different trace elements on the comprehensive properties of Cu-Ni-Si alloy



(a)—不同时效处理后合金的电导率;(b)—不同时效处理后合金的硬度;(c)—时效时长对合金硬度和导热系数的影响;(d)—不同冷变形量对硬度的影响。

(a)—electrical conductivity of alloys after different aging treatments; (b)—hardness of alloys after different aging treatments; (c)—effect of aging time on hardness and thermal conductivity of alloys; (d)—influence of different cold deformation on hardness of alloys.

图2 时效及变形工艺对合金性能的影响^[27,51-52]

Figure 2 The influence of aging and deformation process on alloy properties

5 高性能引线框架铜合金面临的挑战

随着科技的不断发展和电子设备的日益复杂化,高性能引线框架铜合金作为电子封装领域的关键材料,其发展面临着新的挑战。

(1)制备工艺的挑战。高性能引线框架铜合金的制备工艺复杂且成本高昂,如何降低制备成本、提高制备效率并保证材料性能的一致性是当前面临的重要挑战。

(2)性能调控的挑战。高性能引线框架铜合金的性能调控涉及多个因素,如何精确控制材料的组成、结构和性能以满足不同应用需求是当前面临的另一重要挑战。

(3)市场竞争的挑战。随着高性能引线框架铜合金市场的不断扩大和竞争的加剧,如何提高产品质量、降低成本并拓展应用领域是企业面临的重要挑战。

综上所述,高性能引线框架铜合金在未来的发展中将面临着新的趋势和挑战。为了应对这些挑战,需要加强科研投入、推动产学研合作、加强人才

培养和引进等措施,以推动高性能引线框架铜合金的持续发展和创新。

6 结语

高性能引线框架铜合金作为电子封装领域的关键材料,其研究和发展对于推动电子信息产业的进步具有重要意义。本文从引线框架铜合金的定义、性能要求、制备技术、性能评价以及最新研究成果与案例分析等方面进行了全面的阐述和探讨,并指出未来高性能引线框架铜合金的发展方向。

(1)引线框架铜合金的重要性。高性能引线框架铜合金在电子封装领域具有广泛的应用前景和巨大的市场潜力,对于推动电子信息产业的进步具有重要意义。

(2)制备技术的多样性。高性能引线框架铜合金的制备技术多种多样,既有传统的铸造和热加工技术,也有先进的粉末冶金技术、快速凝固技术和纳米晶技术等。这些技术各具特点,可以根据具体性能需求选择合适的制备技术。

(3)性能评价的全面性。高性能引线框架铜合

金的性能评价涉及电学性能、机械性能、耐蚀性能等多个方面,需要采用多种测试方法进行全面评估。

(4)最新研究成果的丰富性。近年来,高性能引线框架铜合金的研究取得了一系列重要成果,包括新型高性能引线框架铜合金的研发,现有铜合金性能的改进与创新以及典型应用案例的分析等。

(5)技术创新的持续推进。随着科技的不断进步和应用需求的不断提高,高性能引线框架铜合金的研究和发展将持续推进,未来需要进一步探索新的合金成分设计、制备工艺优化和性能调控技术,以开发出更加优异的高性能引线框架铜合金。

(6)环保与可持续性的重视。环保与可持续性未来是未来高性能引线框架铜合金发展的重要趋势,未来需要研发更加环保、可回收利用的高性能引线框架铜合金,同时推动绿色制造技术的发展和应用。

(7)智能化与功能化的探索。智能化与功能化是未来高性能引线框架铜合金发展的重要方向,未来需要探索引入先进的传感技术、自修复技术和多功能化设计等手段,进一步提高高性能引线框架铜合金的附加值和应用范围。

(8)国际合作与交流的加强。高性能引线框架铜合金的研究和发展需要加强国际合作与交流,通过加强国际间的学术交流、技术合作和产业协同,可以促进高性能引线框架铜合金的技术创新和应用推广,推动全球电子信息产业的持续发展。

高性能引线框架铜合金作为电子封装领域的关键材料,其研究和发展具有重要的战略意义和广阔的市场前景,未来需要继续加强技术创新、推动产学研合作、加强人才培养和引进等措施,以推动高性能引线框架铜合金的持续发展和创新,为电子信息产业的进步做出更大的贡献。

参考文献:

- [1] PAN S, YU J, HAN J, et al. Customized development of promising Cu-Cr-Ni-Co-Si alloys enabled by integrated machine learning and characterization [J]. *Acta Materialia*, 2023, 243: 118484.
- [2] MA M, LI Z, XIAO Z, et al. Microstructure and properties of Cu-Ni-Co-Si-Cr-Mg alloys with different Si contents after multi-step thermo-mechanical treatment [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 850: 143532.
- [3] JIA L, YANG M F, TAO S P, et al. Microstructure evolution and reaction behavior of Cu-Ni-Si powder system under solid-state sintering [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 271: 124942.
- [4] MA M, XIAO Z, MENG X, et al. Effects of trace calcium and strontium on microstructure and properties of Cu-Cr alloys [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 112: 11-23.
- [5] FUKAMACHI K, KIMURA M. Age-hardening structure and mechanism of Cu-3at% Ni-1.5at% Si corson alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 831: 142220.
- [6] LI J, DING H, LI B, et al. Microstructure evolution and properties of a Cu-Cr-Zr alloy with high strength and high conductivity [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 819: 141464.
- [7] WEI H, CHEN Y, LI Z, et al. Microstructure evolution and dislocation strengthening mechanism of Cu-Ni-Co-Si alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 826: 142023.
- [8] GAMIN Y V, MUÑOZ BOLAÑOS J A, ALESCHENKO A S, et al. Influence of the radial-shear rolling (RSR) process on the microstructure, electrical conductivity and mechanical properties of a Cu-Ni-Cr-Si alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 822: 141676.
- [9] SHEN Z, LIN Z, SHI P, et al. Enhanced electrical, mechanical and tribological properties of Cu-Cr-Zr alloys by continuous extrusion forming and subsequent aging treatment [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 110: 187-197.
- [10] 张生辉,王振涛,李永胜,等.中国关键矿产清单、应用与全球格局[J].*矿产保护与利用*, 2022, 42(5), 138-168.
- [11] 董鑫,曹立军,阮金琦,等.高性能Cu-Ni-Co-Si引线框架材料研究进展[J].*兵器材料科学与工程*, 2022, 45(6): 163-170.
- [12] FU H, ZHANG Y, ZHANG M, et al. Microstructure evolution, precipitation behavior, and mechanical properties of continuously extruded Cu-Ni-Si alloys at different aging treatments [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 317: 117986.
- [13] FU H, YIN Y, ZHANG Y, et al. Enhancing the comprehensive properties of as-cast Cu-Ni-Si alloys by continuous extrusion combined with subsequent thermomechanical treatment [J]. *Materials & Design*, 2022, 222: 111033.
- [14] 谢水生,李彦利,朱琳.电子工业用引线框架铜合金及组织的研究[J].*稀有金属*, 2003(6): 769-776.
- [15] WANG M, YANG Q R, JIANG Y B, et al. Effects of Fe content on microstructure and properties of Cu-Fe alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(10): 3039-3049.
- [16] WANG J F, JIA S G, CHEN S H, et al. Effect of aging precipitation on properties of Cu-Ni-Si-Mg alloy [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 197-198: 1315-1320.
- [17] PAN S, WANG Y, YU J, et al. Accelerated

- discovery of high-performance Cu-Ni-Co-Si alloys through machine learning [J]. *Materials & Design*, 2021, 209: 109929.
- [18] 严绍华. 材料成形工艺基础: 金属工艺学热加工部分 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [19] 李沛勇. 快速凝固/粉末冶金技术制备高性能高温铝合金及其复合材料的进展[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(7): 64-85.
- [20] 刘文胜, 马运柱, 黄伯云, 等. 粉末冶金新技术与新装备[J]. *矿冶工程*, 2007, 27(5): 57-62.
- [21] 刘伟, 李能, 周标, 等. 复杂结构与高性能材料增材制造技术进展[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(20): 128-151.
- [22] MOTT N F. The electrical conductivity of transition metals [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1936(153): 699-717.
- [23] SAPUTRA H A. Electrochemical sensors: Basic principles, engineering, and state of the art [J]. *Chemical Monthly*, 2023, 154(10): 1083-1100.
- [24] 常君, 王明飞, 接金川, 等. Ni/Co 质量比对 Cu-Ni-Co-Si 合金组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(10): 3215-3228.
- [25] LI J, HUANG G, MI X, et al. Influence of the Ni/Co mass ratio on the microstructure and properties of quaternary Cu-Ni-Co-Si Alloys [J]. *Materials*, 2019, 12(18): 2855.
- [26] JEONG Y B, JO H R, KIM J T, et al. A study on the micro-evolution of mechanical property and microstructures in (Cu-30Fe)-2X alloys with the addition of minor alloying elements[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 786: 341-345.
- [27] LEI Q, LI Z, DAI C, et al. Effect of aluminum on microstructure and property of Cu-Ni-Si alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 572: 65-74.
- [28] MA M, XIAO Z, LI Z, et al. Hot deformation and microstructure evolution of a Cu-Ni-Co-Si-Cr-Mg alloy [J]. *Journal of Materials*, 2023, 75(8): 3083-3096.
- [29] DONOSO E, ESPINOZA R, DIÁNEZ M J, et al. Microcalorimetric study of the annealing hardening mechanism of a Cu-2.8Ni-1.4Si (at%) alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 556: 612-616.
- [30] MONZEN R, WATANABE C. Microstructure and mechanical properties of Cu-Ni-Si alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 483-484: 117-119.
- [31] ZHAO D, DONG Q M, LIU P, et al. Aging behavior of Cu-Ni-Si alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 361(1): 93-99.
- [32] ZHANG Y, TIAN B, VOLINSKY A A, et al. Microstructure and precipitate's characterization of the Cu-Ni-Si-P alloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(4): 1336-1341.
- [33] LIU J, WANG X, CHEN J, et al. The effect of cold rolling on age hardening of Cu-3Ti-3Ni-0.5Si alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 797: 370-379.
- [34] LEE E, EUH K, HAN S Z, et al. Tensile and electrical properties of direct aged Cu-Ni-Si-x% Ti alloys [J]. *Metals and Materials International*, 2013, 19(2): 183-188.
- [35] LEE E, HAN S, EUH K, et al. Effect of Ti addition on tensile properties of Cu-Ni-Si alloys [J]. *Metals and Materials International*, 2011, 17(4): 569-576.
- [36] WATANABE C, TAKESHITA S, MONZEN R. Effects of small addition of Ti on strength and microstructure of a Cu-Ni-Si Alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46(6): 2469-2475.
- [37] 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.
- [38] LEI Q, LI S, ZHU J, et al. Microstructural evolution, phase transition, and physics properties of a high strength Cu-Ni-Si-Al alloy [J]. *Materials Characterization*, 2019, 147: 315-323.
- [39] WANG W, KANG H, CHEN Z, et al. Effects of Cr and Zr additions on microstructure and properties of Cu-Ni-Si alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 673: 378-390.
- [40] WU Y, LI Y, LU J, et al. Correlations between microstructures and properties of Cu-Ni-Si-Cr alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 731: 403-412.
- [41] CHENG J Y, TANG B B, YU F X, et al. Evaluation of nanoscaled precipitates in a Cu-Ni-Si-Cr alloy during aging [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 614: 189-195.
- [42] XIAO X P, XIONG B Q, WANG Q S, et al. Microstructure and properties of Cu-Ni-Si-Zr alloy after thermomechanical treatments [J]. *Rare Metals*, 2013, 32(2): 144-149.
- [43] HUANG J, 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: A*, 2019, 744: 754-763.
- [44] ZHAO Z, XIAO Z, LI Z, et al. Microstructure and properties of a Cu-Ni-Si-Co-Cr alloy with high strength and high conductivity [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 759: 396-403.
- [45] CHEN W, WANG M, LI Z, et al. A novel Cu-10Zn-1.5Ni-0.34Si alloy with excellent mechanical property

- through precipitation hardening [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25 (11): 4624-4630.
- [46] CHENNA KRISHNA S, SRINATH J, JHA A K, et al. Microstructure and properties of a high-strength Cu-Ni-Si-Co-Zr alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22(7): 2115-2120.
- [47] HAN S Z, GU J H, LEE J H, et al. Effect of V addition on hardness and electrical conductivity in Cu-Ni-Si alloys [J]. *Metals and Materials International*, 2013, 19(4): 637-641.
- [48] ZHAO D M, DONG Q M, LIU P, et al. Structure and strength of the age hardened Cu-Ni-Si alloy [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 79: 81-86.
- [49] HAN S, LEE J, LIM S, et al. Optimization of conductivity and strength in Cu-Ni-Si alloys by suppressing discontinuous precipitation[J]. *Metals and Materials International*, 2016, 22: 1049-1054.
- [50] XIAO X, YI Z, CHEN T, et al. Suppressing spinodal decomposition by adding Co into Cu-Ni-Si alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 660: 178-183.
- [51] WANG H S, CHEN H G, GU J W, et al. Improvement in strength and thermal conductivity of powder metallurgy produced Cu-Ni-Si-Cr alloy by adjusting Ni/Si weight ratio and hot forging[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 633: 59-64.
- [52] ZHAO Z, ZHANG Y, TIAN B, et al. Co effects on Cu-Ni-Si alloys microstructure and physical properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 797: 1327-1337.
- [53] LEI J, HUI X, SHIPING T, et al. Microstructure and selection of grain boundary phase of Cu-Ni-Si ternary alloys [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(12): 3050-3054.
- [54] ROSSITER P L. *Electrical resistivity of simple metals and alloys* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987: 137-271.

Development and Prospects of Cu-Ni-Si Lead Frame Copper Alloys

LI Changming¹, ZOU Cunlei^{1*}, JIN Han¹, ZHANG Shuang¹, DONG Chuang^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. Key Laboratory of Materials Modification by Laser Ion and Electron Beams Ministry of Education/Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In the electronic packaging industry, high-performance lead frame copper alloys play a pivotal role, exerting a decisive influence on the performance and stability of electronic devices. The development of 5G and artificial intelligence technologies has led to a surge in demand for such materials, with increasingly stringent performance requirements. This article first outlines the development history of lead frame copper alloys, progressing from the Fe-Ni-Co, Cu-Fe, to Cu-Ni-Si systems, emphasizing the importance of material research. Subsequently, it systematically introduces the preparation techniques and performance evaluation of copper alloys, and delves into the impact of composition design, trace element addition, heat treatment, and deformation processes on the properties of Cu-Ni-Si alloys. The article highlights that the addition of trace elements such as Al, Mg, Co, Cr, Ag, P, and Ti can significantly enhance the mechanical properties and electrical conductivity of the alloys, while precise heat treatment and deformation processes are crucial for optimizing the microstructure and macroscopic properties of the alloys. Based on an analysis of existing research, the article summarizes the challenges faced by high-performance lead frame copper alloys, including the complexity of preparation processes, difficulties in performance control, and fierce market competition. At the same time, it points out the challenges faced by high-performance lead frame copper alloys, such as complex preparation processes, difficulties in performance control, and market competition. The article also predicts future trends, including technological innovation, environmental sustainability, intelligent functionalization, and the necessity for international cooperation. Research on high-performance lead frame copper alloys holds significant academic and market value, and is crucial for the advancement of electronic information technology. Future research should explore new alloy design, preparation, and performance control technologies to meet the growing performance demands. Environmental protection, intelligence, and international cooperation will be key to driving the development of this field. This article provides a reference for related research and practice, serving as a valuable reference for promoting the innovation and development of lead frame copper alloys.

Keywords: copper alloys for lead frame; Cu-Ni-Si; preparation technology; trace elements; heat treatment and deformation process; mechanical properties; electrical conductivity; microstructure

(学术编辑:罗永皓)